

**UNIVERSIDADE DE LISBOA**

**INSTITUTO DE GEOGRAFIA  
E  
ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO**



**SUSCEPTIBILIDADE E RISCO DE MOVIMENTOS DE  
VERTENTE NO CONCELHO DE TAROUCA**

**Bruno Miguel do Carmo Santana Meneses**

**MESTRADO EM GEOGRAFIA FÍSICA E ORDENAMENTO  
DO TERRITÓRIO**

2011



**UNIVERSIDADE DE LISBOA**

**INSTITUTO DE GEOGRAFIA  
E  
ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO**



**SUSCEPTIBILIDADE E RISCO DE MOVIMENTOS DE  
VERTENTE NO CONCELHO DE TAROUCA**

**Bruno Miguel do Carmo Santana Meneses**

Dissertação apresentada para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Geografia Física e Ordenamento do Território, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor José Luís Zêzere.

2011



*Aos meus Pais*

*Agostinho Meneses e Rosa Meneses*



## RESUMO

A determinação de áreas susceptíveis a movimentos de vertente no Concelho de Tarouca constitui um imperativo, devido aos prejuízos que estes têm causado, nomeadamente na perda/interrupção de infra-estruturas estratégicas (estradas principais). Face a esta premissa, recorreu-se aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para a construção de uma base de dados, que contempla a informação de um conjunto de variáveis físicas do território e os mapas temáticos com os diferentes tipos de movimentos inventariados no concelho. Esta inventariação apoiou-se na observação de ortofotomapas, interpretação do traçado das curvas de nível e realização de trabalho de campo.

A avaliação da susceptibilidade foi sustentada nas probabilidades condicionadas resultantes do cruzamento entre os factores de predisposição e as áreas instabilizadas. Para a modelação da susceptibilidade recorreu-se às técnicas bi-variadas da Lógica *Fuzzy* e do Valor Informativo, sendo os resultados deste último, validados a partir de taxas de sucesso e de predição. Para a aferição do método mais robusto na determinação da susceptibilidade, fez-se a comparação objectiva através de Curvas de Sucesso e quantificaram-se as diferenças entre os resultados obtidos em cada modelo através do cálculo da respectiva Área Abaixo da Curva.

Com os resultados obtidos desta avaliação, localizou-se o risco de movimentos de vertente, tendo por base os elementos expostos existentes no território. Nesta determinação incrementou-se o factor distância percorrida por unidade de tempo a partir de um equipamento operacional, admitindo-se que, à medida que há um afastamento, o risco incrementa, pela redução da eficácia de socorro dos meios de emergência, num eventual cenário de movimento de vertente do qual resulte consequências sobre pessoas ou bens. Neste contexto, as várias infra-estruturas rodoviárias adquirem elevada importância, pois o seu condicionamento, pela sua perda ou obstrução, tem várias implicações operacionais e na mobilidade de pessoas e bens. Assim, admitindo estes condicionalismos, determinaram-se os locais com maior probabilidade de interrupção, com base na susceptibilidade do território a movimentos de vertente criando-se um modelo de determinação de rotas alternativas, em função destas interrupções.

**PALAVRAS-CHAVE:** Movimentos de vertente, Avaliação da susceptibilidade e do risco, Condicionalismos operacionais, Concelho de Tarouca.





## ABSTRACT

Determining the location of areas susceptible to slope movements within the Tarouca County is imperative due to the damages they have caused, namely the loss and interruption of strategic infrastructures (main roads). Based on this premise, the Geographic Information System (GIS) was used to build a data base, which contains information on a group of physical variables of the territory and the theme maps with the different types of movements listed in the county. This inventory was based on the analysis of orthophotomaps, the interpretation of elevation curves and field work.

The susceptibility assessment was sustained by the calculation of conditional probabilities, which resulted from the crossing between the landslide predisposition factors and three types of landslides. To model the susceptibility Information Value and the Fuzzy Logic operators (Sum and Gamma) were employed and the success rate curves of the models were built. In addition, the prediction rate was also computed for the Information Value method. The landslide susceptibility models were quantitatively compared through the calculation of the Area Under the Curve for both Success and Prediction Rate Curves.

The assessment results were used to locate the landslide risk, having into account the exposed elements present in the territory. In this case, the factor distance travelled by time unit was accounted, assuming that the longer the distance, the higher the risk. This option takes in consideration the decrease on efficiency of the emergency services response in a slope movement event scenario resulting in damage to people and property.

In this context, the road infrastructure acquires high importance, once its conditioning, through loss or obstruction, has strong mobility and operational constrains. Therefore, acknowledging these risk factors, the road tracks having the highest probability to be interrupted by slope instability were assessed based on the landslide susceptibility map. Finally, a model was created which provides alternative routes depending on these interruptions.

**KEYWORDS:** Slope Movements, Susceptibility and Risk Assessment, Operational Conditioning, Tarouca County.



# ÍNDICE

<b>RESUMO .....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE .....</b>	<b>VII</b>
<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>XI</b>
<b>ABREVIATURAS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1 - MOVIMENTOS DE VERTENTE, SUSCEPTIBILIDADE E RISCO GEOMORFOLÓGICO .....</b>	<b>5</b>
1. 1. Os movimentos de vertente enquanto catástrofe natural.....	5
1. 2. Tipologia dos movimentos de vertente .....	5
1. 2. 1. Deslizamentos.....	6
1. 2. 2. Desabamentos.....	10
1. 2. 3. Escoadas .....	11
1. 3. Factores condicionantes e desencadeantes.....	12
1. 4. Da susceptibilidade à localização do risco.....	14
1. 4. 1. Susceptibilidade .....	14
1. 4. 2. Risco.....	17
<b>CAPÍTULO 2 - ENQUADRAMENTO DO CONCELHO DE TAROUCA .....</b>	<b>21</b>
2. 1. A geografia.....	21
2. 2. A geologia .....	22
2. 3. A geomorfologia.....	24
2. 4. O clima.....	26
2. 5. A ocupação Antrópica .....	27

<b>CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA .....</b>	<b>29</b>
3. 1. Recolha de informação.....	29
3. 1. 1. Inventariação de movimentos de vertente.....	29
3. 1. 2. Validação dos movimentos de vertente inventariados.....	32
3. 1. 3. Informação geográfica utilizada na modelação da susceptibilidade a movimentos de vertente. Recolha de dados complementares para correcção do Modelo Digital de Terreno.....	35
3. 2. Modelação e validação da susceptibilidade a movimentos de vertente.....	37
3. 2. 1. Método do Valor Informativo.....	39
3. 2. 2. Método da Lógica <i>Fuzzy</i> .....	40
3. 2. 3. Validação da susceptibilidade a movimentos de vertente .....	41
3. 3. Avaliação da importância de cada factor de predisposição na modelação da susceptibilidade .....	43
3. 4. Determinação da Localização do Risco a movimentos de vertente.....	44
3. 5. Consequências operacionais derivadas da perda de infra-estruturas devido a movimentos de vertente.....	45
3. 5. 1. Determinação de percursos óptimos em função da perda ou interrupção de vias rodoviárias.....	46
<b>CAPÍTULO 4 - SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE .....</b>	<b>49</b>
4. 1. Movimentos de vertente validados e a sua distribuição no território .....	49
4. 2. Variáveis utilizadas na modelação da susceptibilidade a movimentos de vertente ...	51
4. 3. Avaliação e validação da susceptibilidade a movimentos de vertente com diferentes métodos estatísticos .....	57
4. 3. 1. Probabilidades condicionadas.....	57
4. 3. 2. Valor Informativo .....	60
4. 3. 3. Lógica <i>Fuzzy</i> .....	65
4. 3. 4. Comparação entre modelos preditivos .....	70

4. 5. Importância de cada factor de predisposição na modelação da susceptibilidade ...	71
4. 6. Susceptibilidade do território a movimentos de vertente, segundo as áreas a integrar a REN.....	77
<b>CAPÍTULO 5 - RISCO DE MOVIMENTOS DE VERTENTE E CONDICIONALISMOS DERIVADOS DA PERDA DE INFRA-ESTRUTURAS ESTRATÉGICAS .....</b>	<b>81</b>
5. 1. Localização e avaliação qualitativa do risco de movimentos de vertente .....	81
5. 2. Elementos expostos e o risco do território a movimentos de vertente .....	84
5. 3. Consequências operacionais derivadas da perda de infra-estruturas estratégicas ...	85
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>89</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>93</b>
<b>OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO .....</b>	<b>101</b>
<b>DOCUMENTOS CARTOGRÁFICOS.....</b>	<b>103</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>105</b>
<b>ÍNDICE DE QUADROS.....</b>	<b>109</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>111</b>



## AGRADECIMENTOS

Ao longo da Licenciatura em Geografia, despertou em mim um interesse particular pela Geografia Física e, em função desta, defini todo o meu percurso académico, seguindo sempre o que mais gostaria de aprender. Assim, nasce um interesse peculiar pela Geomorfologia, por um lado pelos conteúdos leccionados mas, por outro, pelo grupo de trabalho, no qual se incluem docentes, colegas e amigos, que muito me ensinaram. A disciplina Dinâmica de Vertentes e Riscos Geomorfológicos, leccionada pelo Prof. Dr. José Luís Zêzere no ano lectivo 2008/09, foi fulcral na escolha do tema desta dissertação, pois percebi a importância da determinação da susceptibilidade e risco de movimentos de vertente no contexto dos riscos geomorfológicos, na redução de danos materiais e, sobretudo, na minimização de perdas de vidas humanas. Assim, demonstro aqui a minha gratidão a todos os que me acompanharam e ajudaram ao longo deste percurso.

No decorrer desta dissertação, foram vários os obstáculos ultrapassados, manifestando aqui o meu agradecimento a todos os que contribuíram de forma directa e indirecta para a sua realização.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, pela simpatia com que sempre me recebeu e por todas as indicações e sugestões que foi dando na elaboração desta dissertação. Agradeço toda a informação por si disponibilizada, explicação pormenorizada dos vários métodos de identificação de movimentos de vertente e avaliação de susceptibilidade e risco. Agradeço, também, todas as correcções por si sugeridas. Reconheço que sem a sua preciosa ajuda não seria possível obter os resultados pretendidos.

Aos meus familiares, pela forma sentida da minha ausência ao longo de todos estes anos de formação académica, agradeço, todo o apoio incondicional, sem o qual não teria sido possível continuar o meu trabalho. Agradeço, ainda, o gosto que me foram inculcando ao longo da minha vida, por estas questões relacionadas com o território, em particular com o solo e, por todo o conhecimento que me transmitiram, proveniente do seu senso comum, bem como, a orientação num sentido construtivo e humano, que despertou em mim uma sensibilidade peculiar com todos os fenómenos ocorridos no território, principalmente, aqueles que têm consequências humanas.

À Dr.<sup>a</sup> Inês Fonseca, agradeço a cedência de dados georreferenciados em formato vectorial da área de estudo e a bibliografia referente aos solos.

Ao Luís Faria, colega de longas jornadas, agradeço a sua prontidão e disponibilidade oferecida desde o início para efectuar os vários trabalhos de campo e, também, todas as impressões dos vários mapas que serviram de base aos vários levantamentos de movimentos aqui efectuados. Agradeço ainda a sua revisão e opiniões sugeridas.

Agradeço a Rita Azevedo a sua amabilidade pela ajuda prestada na tradução de textos.

À Câmara Municipal de Tarouca agradeço toda a informação disponibilizada e o interesse manifestado desde o primeiro contacto no desenvolvimento da investigação desta dissertação na sua área administrativa. Em particular, ao Dr. Humberto Sarmiento, Comandante Operacional Municipal da Protecção Civil de Tarouca, pela amabilidade com que me recebeu, dados disponibilizados, prontidão para ajudar no trabalho de campo e, sobretudo, o interesse manifestado da sua parte nos resultados obtidos. Agradeço-lhe, também, as várias visitas guiadas pelas diversas áreas do Concelho, a informação detalhada de alguns movimentos de vertentes ocorridos recentemente e a ajuda na localização de equipamentos estratégicos/vitais/sensíveis, informação indispensável para a realização da Carta de Elementos Expostos.

Em especial, a Mara Rocha, agradeço todo o seu apoio e paciência nas horas mais difíceis, mas, sobretudo, pelas ideias e correcções que me foi sugerindo no desenrolar da dissertação. Também pela força e coragem que me transmitiu nas horas de maior tensão.

Finalmente, agradeço a todos os meus amigos que me incentivaram a progredir no desenvolvimento da minha investigação.



## ABREVIATURAS

<b>BGRI</b>	Base Geográfica de Referenciação da Informação
<b>BVT</b>	Bombeiros Voluntários de Tarouca
<b>CAOP</b>	Carta Administrativa Oficial de Portugal
<b>CMT</b>	Câmara Municipal de Tarouca
<b>COS</b>	Carta de Ocupação do Solo
<b>DR</b>	Detecção Remota
<b>E</b>	Este
<b>EN</b>	Estrada Nacional
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>IGeoE</b>	Instituto Geográfico do Exército
<b>IGOT</b>	Instituto de Geografia e Ordenamento do Território
<b>IGP</b>	Instituto Geográfico Português
<b>INE</b>	Instituto Nacional de Estatística
<b>m<sup>2</sup></b>	Metro quadrado
<b>N</b>	Norte
<b>NE</b>	Nordeste
<b>NW</b>	Noroeste
<b>PC</b>	Protecção Civil
<b>REN</b>	Reserva Ecológica Nacional
<b>S</b>	Sul
<b>SE</b>	Sudeste
<b>SHP</b>	Shape File
<b>SIG</b>	Sistemas de Informação Geográfica
<b>SNIG</b>	Sistema Nacional de Informação Geográfica
<b>SNIRH</b>	Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos
<b>SW</b>	Sudoeste
<b>VI</b>	Valor Informativo
<b>W</b>	Oeste
<b>ZCI</b>	Zona Centro Ibérica



## INTRODUÇÃO

Os movimentos de vertente assumem na actualidade uma importância relevante como catástrofe natural, no âmbito dos riscos geomorfológicos, depois de se reconhecerem os grandes prejuízos (infra-estruturas destruídas, entre outros) e dramas pessoais (mortes, desalojados, ...) que resultam destes episódios (CARRARA *et al.*, 2003). Este reconhecimento teve maior ênfase depois dos grandes movimentos ocorridos recentemente nos climas tropicais (REBELO, 2010).

Os movimentos de vertente inserem-se no conjunto dos movimentos de massa e são designados no domínio da Geomorfologia como “...a deslocação de materiais sólidos ao longo das vertentes naturais, induzida pela acção da gravidade, isto é, sem auxílio de um agente de transporte, seja ele as águas correntes, os glaciares ou o vento” (FERREIRA, 2005, p.198).

Em Portugal, estes eventos geomorfológicos têm causado algumas vítimas e diversas perdas económicas, resultantes da destruição completa ou parcial de estruturas e infra-estruturas (ZÉZERE *et al.*, 2007a; PIEDADE *et al.*, 2010). Na Região Norte estas perdas são significativas, havendo vários relatos e indícios geomorfológicos, que demonstram as gravíssimas consequências derivadas deste tipo de catástrofe (BATEIRA e ABREU, 2003; PEREIRA, 2009). No Concelho de Tarouca (área de estudo), embora não se tenha encontrado registos de perdas humanas, há a indicação de diversos prejuízos materiais (e.g. estruturas danificadas, vias rodoviárias destruídas ou interrompidas) resultantes destes movimentos.

Face a todas as consequências derivadas dos movimentos de vertente, esta temática tem vindo a assumir maior importância e sensibilidade, por um lado, pela comunidade científica, ao desenvolver e a aprofundar a sua investigação neste domínio, mas por outro, pelas entidades responsáveis pela gestão do território e entidades operacionais da Protecção Civil (socorro/emergência), no desenvolvimento de planos que consideram os riscos geomorfológicos. Recentemente, tornou-se fundamental determinar as áreas susceptíveis à ocorrência destes movimentos, com especial interesse no Ordenamento do Território, no sentido de se evitar, caso ocorra determinado evento, a perda de vidas humanas e prejuízos materiais, ou seja, desenvolvendo o conceito de política preventiva. Adicionalmente, a susceptibilidade, cruzada com os elementos em risco, constitui uma ferramenta essencial para as entidades que prestam socorro ou actuam em caso de emergência, ao permitir

reconhecer quais as áreas com maior probabilidade à ocorrência destes movimentos e, também, o risco aí existente, permitindo-lhes actuar com maior eficácia.

Neste contexto, pretende-se testar vários modelos de determinação de áreas susceptíveis aos movimentos de vertente. Este constitui o objectivo primordial desta dissertação, pela indicação de qual o modelo com maior robustez, face aos dados que irão integrar a modelação da susceptibilidade (factores de predisposição e manifestações de instabilidade verificadas no território), de forma a determinar as áreas onde é mais provável virem a ocorrer os próximos movimentos. Com os resultados aqui obtidos, pretende-se localizar o risco, adoptando-se neste procedimento algumas metodologias, em função das orientações emanadas pela Autoridade Nacional de Protecção Civil (JULIÃO *et al.*, 2009), constituindo-se este, como o segundo objectivo desta dissertação. Identificadas as áreas de risco e com maior índice de susceptibilidade, pretende-se ainda determinar possíveis consequências operacionais resultantes da destruição de determinadas infra-estruturas estratégicas, na sequência da ocorrência de movimentos de vertente, constituindo este o terceiro objectivo do trabalho.

Descritos os objectivos, colocam-se algumas perguntas de partida, às quais se tentará encontrar respostas no desenvolvimento desta dissertação. Esta problemática incidirá, fundamentalmente, em saber:

1. Quais são as variáveis mais importantes para a determinação da susceptibilidade a movimentos de vertente no Concelho de Tarouca?
2. Em que áreas do Concelho de Tarouca irão ocorrer os próximos movimentos de vertente?
3. Quais são e onde se localizam os elementos em risco?
4. Quais são as áreas com índice de risco mais elevado?
5. Quais são as consequências operacionais da perda da funcionalidade de infra-estruturas estratégicas pela ocorrência de movimentos de vertente?

Esta dissertação, desenvolvida numa área de trabalho que corresponde ao Concelho de Tarouca, está estruturada em 5 capítulos, começando por se apresentar o estado da arte sobre o tema em análise, seguindo-se a apresentação da área de estudo, das metodologias de análise e avaliação da susceptibilidade e do risco a movimentos de vertente, até à análise

das consequências derivadas destes eventos. Por fim, faz-se a análise dos resultados obtidos e apresentam-se as considerações finais.

No capítulo 1 efectua-se uma breve abordagem dos conceitos e terminologia respeitante aos movimentos de vertente, segundo a perspectiva de vários autores, descrevendo-se os principais factores condicionantes e desencadeantes destes eventos. Aborda-se, também, alguma literatura científica sobre vários elementos que integram o modelo conceptual do risco geomorfológico, com destaque para a susceptibilidade e o risco propriamente dito.

No capítulo 2 faz-se o enquadramento da área de estudo, incluindo as componentes geográfica, geológica, geomorfológica e climática. A componente antrópica é também abordada, efectuando-se uma breve descrição da distribuição da população pelo território e as suas intervenções no mesmo como factores que promovem a instabilidade das vertentes.

O capítulo 3 é dedicado à metodologia. Esta inicia-se na recolha de informação, referindo-se quais os métodos de inventariação dos movimentos de vertente e como os resultados aqui obtidos foram validados no terreno, até à recolha e tratamento de outra informação em gabinete, nomeadamente informação georreferenciada que compõe as várias variáveis independentes que integraram a modelação da susceptibilidade. Seguidamente, apresentam-se os métodos estatísticos utilizados para avaliar a susceptibilidade e os procedimentos adoptados para determinar a localização do risco. Por último, apresenta-se um modelo de determinação de percursos óptimos, em função da perda simulada de infra-estruturas rodoviárias, integrando-se nesta análise, a informação relativa à susceptibilidade e risco.

No capítulo 4 apresentam-se os dados resultantes do trabalho de campo devidamente tratados e as variáveis reclassificadas para a integração na modelação da susceptibilidade. Seguidamente apresentam-se os principais resultados derivados dos vários modelos estatísticos utilizados e faz-se a análise dos mesmos, de modo a aferir qual o melhor resultado para a composição da Carta de Susceptibilidade a movimentos de vertente, segundo as orientações do Regime Jurídico da REN.

No capítulo 5 aborda-se a localização do risco, em função das componentes que o integram, fazendo-se uma breve análise das áreas com o índice mais elevado e quais os elementos expostos presentes no território. Em função da localização do risco e da susceptibilidade do território a movimentos de vertente, faz-se a análise dos condicionalismos derivados da perda da funcionalidade de infra-estruturas estratégicas, nomeadamente, vias rodoviárias.



# **CAPÍTULO 1 - MOVIMENTOS DE VERTENTE, SUSCEPTIBILIDADE E RISCO GEOMORFOLÓGICO**

## **1. 1. OS MOVIMENTOS DE VERTENTE ENQUANTO CATÁSTROFE NATURAL**

Os movimentos de vertente são considerados como um dos grandes problemas naturais em várias regiões da Terra, sendo responsáveis por grandes fatalidades, nomeadamente, perdas sociais e económicas (POPESCU, 2002; CARRARA *et al.*, 2003; HUABIN *et al.*, 2005; ROTARU *et al.*, 2007). O crescimento urbano e da rede de transportes para áreas susceptíveis a estes movimentos, aumentam o impacto potencial destes eventos (POPESCU, 2002; CARRARA *et al.*, 2003; EUROPEAN COMMISSION, 2003), resultando por vezes no que se denomina por catástrofe natural.

A palavra catástrofe, derivada do latim *calamitate* (calamidade), é muitas vezes usada despropositadamente, visto não integrar o conceito que a descreve (grande desgraça que atinge muitas pessoas). Com efeito, a designação de catástrofe natural tem sido frequentemente atribuída indiscriminadamente à ocorrência de eventos considerados por muitos, como “anormais”, por exemplo, sismos, cheias, entre outros, o que nem sempre é correcto. O termo “catástrofe natural” deve ser utilizado quando resultam vítimas e/ou danos materiais relevantes, derivados da ocorrência de determinado evento físico (FERRIS, 2009; HOFFMANN, 2002), como por exemplo vulcões, sismos, movimentos de vertente, entre outros. BLAIKIE *et al.* (1994) mencionam que as catástrofes ocorrem apenas quando a perigosidade se cruza com a vulnerabilidade. A capacidade de resistência dos elementos expostos (população e bens materiais) a estes eventos é o principal factor que irá determinar o grau de perda e a extensão dos danos causados (BANKOFF *et al.*, 2004).

## **1. 2. TIPOLOGIA DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE**

As diferentes tipologias de movimentos de vertente podem resultar das distintas características das vertentes (declives, exposições, ...), ocupação pela vegetação, coesão do material, etc., mas também pelas diferentes características dos factores desencadeantes,

como por exemplo, fenómenos climáticos, acções antrópicas, entre outros (REBELO, 2003; ELDREDGE *et al.*, 2008).

Segundo VARNES (1978) e CRUDEN e VARNES (1996), os movimentos de vertente são classificados de acordo com o tipo de mecanismo e, também, em função do tipo de material. Em função do mecanismo, distinguem-se deslizamentos (*slides*), desabamentos (*falls*), escoadas (*flows*), balançamentos (*topples*) e expansões laterais (*lateral spreads*). Quanto ao tipo de material, considera-se a rocha, os detritos (material grosseiro) e solo ou material fino.

Nos pontos seguintes descrevem-se detalhadamente apenas os tipos de movimentos de vertente que foram identificados na área de estudo.

### 1. 2. 1. DESLIZAMENTOS

Este tipo de movimentos de vertente, também conhecido por escorregamento (MATOS, 2008; REBELO, 2010, p.61), é um “... *movimento de solo ou rocha que ocorre predominantemente ao longo de planos de ruptura ou de zonas relativamente estreitas, alvo de intensa deformação tangencial...*” (WL/WLI, 1993, citado em ZÊZERE, 1997, p.51). Em função do plano de ruptura, estes subdividem-se em deslizamentos rotacionais e translacionais (com plano de ruptura planar ou compósito). Este plano de ruptura é definido como a superfície ao longo da qual ocorre o movimento tangencial (ZÊZERE, 2005).

Na avaliação deste tipo de movimentos é importante considerar o tipo de ruptura e material afectado, de forma a se proceder da maneira mais coerente, quando esteja em prática o ordenamento do território (VARNES, 1978).

Em função destes dois factores, distinguem-se os seguintes movimentos:

#### 1. 2. 1. 1. Deslizamentos Rotacionais

Estes movimentos, também conhecidos por *slumps*, ocorrem ao longo de um plano de ruptura côncavo (VARNES, 1978), como se observa na Figura 1.1. Em função da posição do plano de ruptura, estão subdivididos por ruptura de vertente, de sopé e de base



(ZÊZERE, 2005). Estes deslizamentos ocorrem em meios isotrópicos e homogéneos, podendo desencadear-se nos três tipos de material anteriormente mencionados, com diferentes tipos de actividade (simples, múltiplo e sucessivo). Relativamente às formas originadas, no corpo do deslizamento pode formar-se um aclave, resultante da deformação causada pelo movimento rotacional da massa afectada.

Neste tipo de movimento, as depressões resultantes podem originar a acumulação de água, um factor preponderante para o aumento da instabilidade da massa já deslizada, contribuindo para o desencadeamento de um novo movimento, principalmente quando esta acumulação é no sector montante, sendo por isso decisiva a drenagem destas áreas.

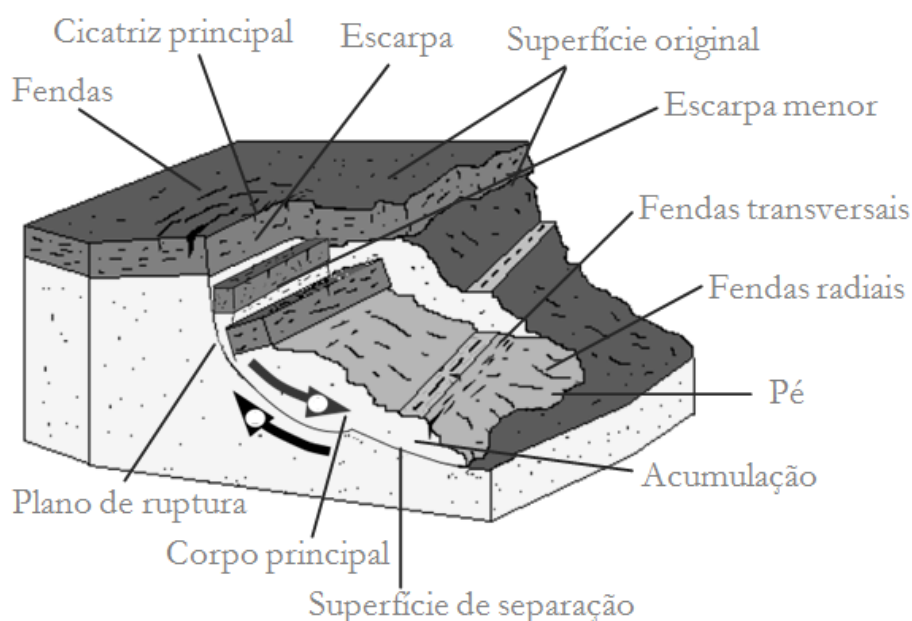


Figura 1.1. Exemplo de um deslizamento rotacional (adaptado de VARNES, 1978).

Quanto ao volume de terreno afectado neste tipo de movimentos, segundo ZÊZERE (2005), pode ser determinado com base na adaptação de modelos geométricos, a partir da seguinte expressão:

$$V = \frac{1}{6} \pi L W D d \quad [1.1]$$

Sendo:

- $V$  – volume ( $m^3$ );
- $L$  – comprimento total da área afectada (m);
- $W$  – largura máxima da área afectada (m);
- $Dd$  – espessura máxima da massa deslizada, podendo ser substituída pela profundidade máxima do plano de ruptura (m).

### 1. 2. 1. 2. Deslizamentos Translacionais

Estes movimentos implicam uma translação que ocorre numa vertente, seguindo, na maior parte dos casos, uma superfície plana, bem lubrificada e com alguma inclinação (REBELO, 1977), obtendo por isso a sua designação de movimentos translacionais (*translational slides*). Estes deslizamentos subdividem-se em função do tipo de plano de ruptura, obtendo-se os denominados deslizamentos translacionais com ruptura compósita e os deslizamentos com ruptura planar (DIKAU *et al.*, 1996). Nos primeiros, o plano de ruptura apresenta duas secções, uma de forma circular ou planar a montante com forte inclinação e outra, no sector jusante, de forma planar com inclinação mais reduzida. Já o segundo tipo de deslizamentos é controlado pela estrutura, desenvolvendo-se o plano de ruptura “...ao longo de superfícies de fraqueza marcadas por uma resistência ao corte reduzida, como falhas, planos de estratificação, diáclases, ou contacto entre a cobertura detrítica e o substrato rochoso ...” (ZÊZERE, 2005, pp.43-44). Relativamente a este último tipo de deslizamentos, subdivide-se em função do material afectado, podendo distinguir-se deslizamentos lamacentos, de detritos e de rocha (VARNES, 1978). Segundo ZÊZERE (2005), os primeiros são movimentos lentos e ocorrem ao longo de planos de ruptura descontínuos, em terrenos compostos por argila, silte e areia fina e, morfologicamente, apresentam planos de ruptura, áreas de acumulação, formas em língua com frente arredondada, perfil longitudinal sinusoidal e orlas laterais a flanquear a área afectada; já os deslizamentos de detritos são pouco profundos e apresentam planos de ruptura quase paralelos à superfície topográfica, muitas das vezes coincidentes com o contacto entre o substrato e um depósito de vertente; por último, os deslizamentos de rocha (subdividem-se em deslizamentos com ruptura em cunha, escadaria e planar) ocorrem ao longo de discontinuidades estruturais concordantes com o declive, sendo a inclinação do plano de estratificação inferior ao declive.

O deslizamento que ocorreu no final de Novembro de 2006 na Serra de Santa Helena (Fig. 1.2) é um bom exemplo de deslizamento translacional. É um deslizamento translacional planar superficial, por estar condicionado pela estrutura e apresentar um plano de ruptura inferior a 2m de profundidade. Este movimento ocorreu numa vertente íngreme, com alguma intervenção antrópica, nomeadamente a construção de um caminho na extremidade jusante do plano de ruptura, intervenção considerada por ZÊZERE (2001a) um factor de instabilidade quando desajustada. O substrato rochoso desta área está coberto por detritos, sendo a sua matriz composta por cascalho, areia e sedimentos finos, elementos que

proporcionaram, em conjunto com o excesso de água que circulou nestes terrenos, a evolução do deslizamento para uma escoada.

Considerando as orientações descritas em ZÊZERE (2005), o volume de massa afectada neste tipo de movimento de vertente, pode obter-se a partir da seguinte equação:

$$V = 0.785abh \quad [1.2]$$

Sendo:

- $V$  – ao volume ( $m^3$ );
- $a$  – metade da largura máxima do plano de ruptura ( $m$ );
- $b$  – comprimento do plano de ruptura ( $m$ );
- $h$  – altura da cicatriz ( $m$ ).

Considerando o exemplo do movimento anteriormente referido, ao aplicar-se esta equação, obteve-se um volume de  $316,6 m^3$  de terreno afectado.

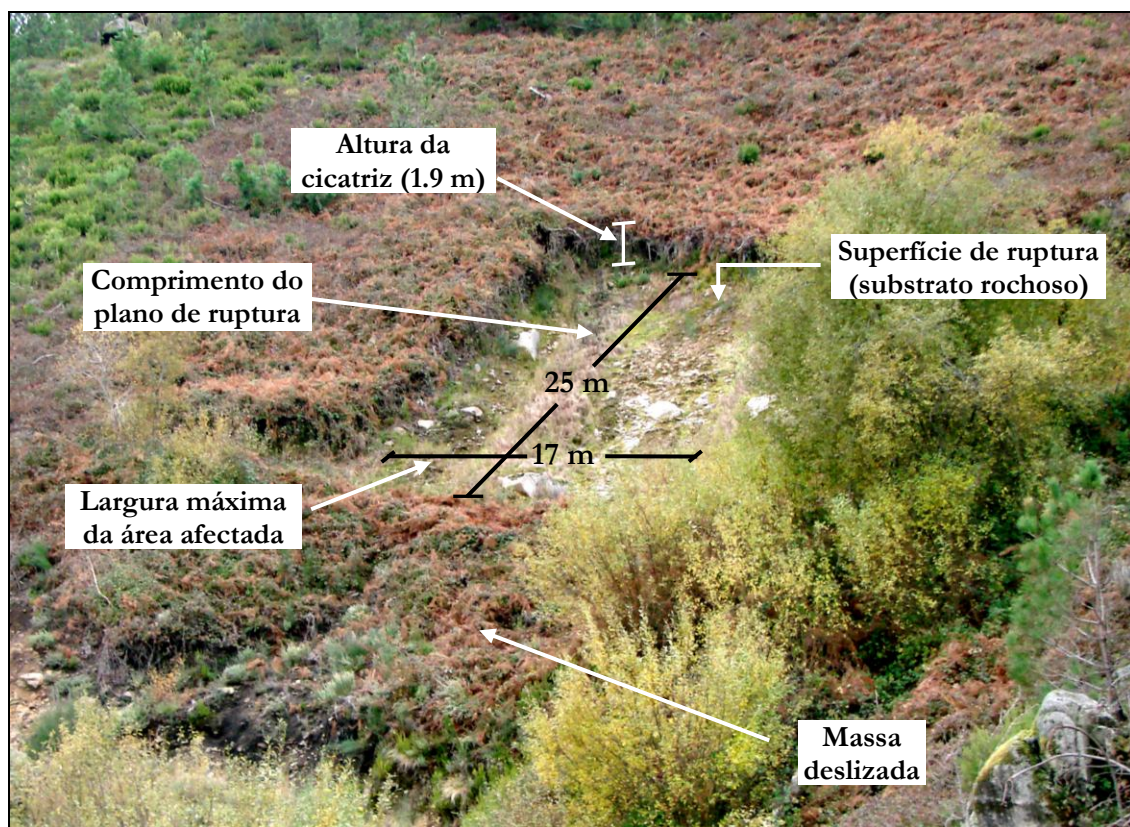


Figura 1.2. Deslizamento translacional na Serra de Santa Helena (vertente exposta a NE).

### 1. 2. 2. DESABAMENTOS

Este tipo de movimentos é definido por ZÊZERE (2000, p.11, traduzindo a proposta da Working Party on World Landslide Inventory) como a “... *deslocação de solo ou rocha a partir de um abrupto, ao longo de uma superfície onde os movimentos tangenciais são nulos ou reduzidos...*”.

No desencadeamento destes movimentos podem estar vários factores como a formação de gelo ou acumulação de água nas fissuras (Fig. 1.3), vibrações intensas, erosão e intervenção antrópica (e.g. escavação), sendo impulsionados pela força de gravidade exercida pelo peso de uma massa substancial (solo, rocha ou detritos), o que dá origem a uma queda brusca (deslocação extremamente rápida), considerando-se por isso muito destrutivos (VARNES, 1978; HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008). A partir desta queda abrupta, podem desencadear-se outros processos, nomeadamente, o rolamento ou a saltação de pequenos fragmentos, ao longo das vertentes, oriundos da desintegração da massa afectada no momento de impacto com a superfície a jusante. Neste sentido, o declive das vertentes é factor importante para a continuação do movimento da massa instabilizada.

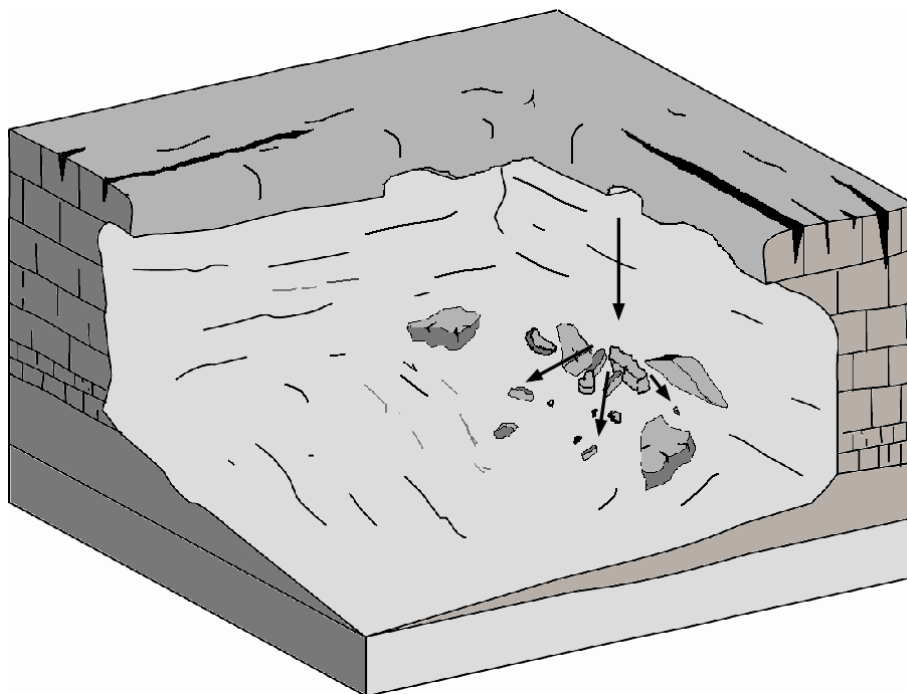


Figura 1.3. Representação de um desabamento (adaptado de VARNES, 1978).

### 1. 2. 3. ESCOADAS

As escoadas são movimentos contínuos de massa (muito semelhante a um material viscoso) ao longo das vertentes em que as superfícies de tensão tangencial são mal preservadas e efémeras (ZÉZERE, 2000). Estes movimentos são diferenciados em função do material envolvido (VARNES, 1978; HUTCHINSON, 1988; CRUDEN e VARNES, 1996; ZÉZERE, 2005), resultando a divisão em três subtipos de escoadas:

- A. **Em rocha** – são movimentos muito lentos, mais ou menos permanentes no tempo, que ocorrem em formações rochosas, em deformações distribuídas ao longo de planos de estratificação ou diáclases;
- B. **Lamacentas** – compostas por elevada proporção de materiais finos (argila, silte e areia) e água, dos quais resulta um fluido viscoso. Este tipo de movimento pode ser lento ou muito rápido, dependendo da carga sólida, teor em água e declive do canal.
- C. **De detritos** – é um movimento com elevado potencial de destruição, composto por uma mistura de materiais finos (areia, silte e argila), materiais grosseiros (cascalho, seixos e blocos) e água. No canal por onde circula este material e nos respectivos diques laterais há erosão (processo mais significativo no substrato, segundo NETTLETON *et al.*, 2005), aumentando desta forma a carga de detritos, elevando, em paralelo, a capacidade erosiva e, também, o potencial destrutivo.

A escoada de detritos que ocorreu em 2006 na Serra de Santa Helena (vertente voltada para Tarouca), resultante da evolução do deslizamento translacional que ocorreu a montante (Fig. 1.4), prolongou-se por uma linha de água pré-existente (cerca de 900m) até à área mais deprimida, onde se formou um leque de detritos (área de deposição). O material não consolidado que existia junto à linha de água (cascalho e alguns blocos de granito), em conjunto com a água que circulava na mesma (escoamento), contribuíram para a amplificação do movimento. Deste movimento resultaram directamente danos materiais e, indirectamente, custos adicionais a todos os utilizadores da E.N. 530, ao serem obrigados a desviar o seu percurso, devido à interrupção temporária da via.





Figura 1.4. Escoada numa vertente da Serra de Santa Helena.

### 1. 3. FACTORES CONDICIONANTES E DESENCADEANTES

Definir qual a causa que esteve na origem de determinado movimento de vertente é uma acção deveras complexa, pois há diversos factores envolvidos, podendo alguns deles estar na origem da redução do grau de estabilidade da vertente, enquanto outros poderão ser responsáveis pelo desencadeamento do movimento. Geralmente, o factor final é somente um mecanismo desencadeante que coloca em movimento uma massa que se encontrava no limiar de ruptura (ZÊZERE, 2005).

Nesta abordagem, GLADE e CROZIER (2005) mencionam a existência de três tipos de factores, designados por factores de predisposição, factores preparatórios e factores desencadeantes.

Por factores de predisposição da instabilidade das vertentes compreendem-se todos os factores que são inerentes e estáticos ao terreno, que condicionam o grau de instabilidade potencial das vertentes, sendo estes determinantes na variação espacial do grau de susceptibilidade do território à instabilidade (GLADE e CROZIER, 2005; ZÊZERE, 2005). Neste contexto integram-se os factores geológicos (e.g. composição e consolidação

dos materiais, descontinuidades, fissuração e permeabilidade), morfológicos (e.g. declive e curvatura das vertentes) e a ocupação do solo, como por exemplo, a cobertura vegetal, embora este seja considerado um factor de estabilidade complexo, muito dependente das condições locais do solo, nomeadamente da profundidade dos potenciais planos de rotura (VARNES, 1984).

Os factores desencadeantes são a causa imediata da instabilidade, ou seja, desencadeiam o movimento de vertente. Estes integram determinados processos físicos (e.g. precipitação, variação do nível das toalhas freáticas, sismos, fusão da neve, erosão do suporte basal das vertentes, erupções vulcânicas) e determinadas actividades antrópicas (e.g. construção de estradas, cortes ou fortes vibrações nos taludes, explosões, escavações). Estes são os factores que irão determinar o ritmo temporal dos movimentos de vertente (ZÉZERE, 2005).

Além dos factores anteriormente mencionados, existem os factores preparatórios. Estes são dinâmicos e promovem a diminuição da estabilidade da vertente, no entanto, sem desencadear o movimento (HUFSCMIDT *et al.*, 2005). Consideram-se, por exemplo, episódios prolongados de fraca intensidade de precipitação, que embora não desencadeiem o movimento, poderão originar acumulação de água nas vertentes (dependente da permeabilidade do material e escoamento superficial e subterrâneo) promovendo, desta forma, a redução da sua margem de segurança.

Considerando o exemplo do deslizamento ocorrido na Serra de Santa Helena em Novembro de 2006, referido anteriormente, os episódios de elevada precipitação nos dias antecedentes à data da sua ocorrência contribuíram para a redução da estabilidade da vertente e, posteriormente, para o desencadeamento deste movimento, facto corroborado pelos dados de precipitação registados pelas estações meteorológicas mais próximas (Fig. 1.5). O movimento não se desencadeou imediatamente nos dias de maior precipitação (24 e 25 de Novembro) mas sim, num segundo episódio de menor precipitação após este período. O primeiro episódio permitiu a acumulação de água nas vertentes (factor preparatório), funcionando o episódio seguinte como o factor desencadeante da massa que se encontrava no seu limiar de ruptura.

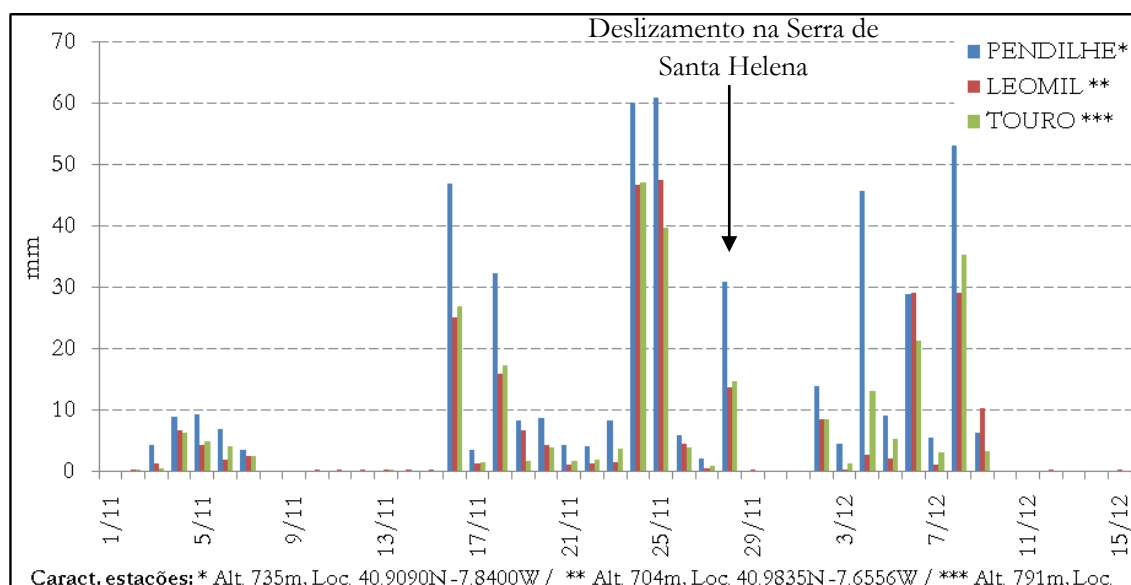


Figura 1.5. Precipitação diária registada nas estações meteorológicas de Pendilhe, Leomil e Touro entre 1 Nov. e 15 de Dez. de 2006.

#### 1. 4. DA SUSCEPTIBILIDADE À LOCALIZAÇÃO DO RISCO

Considerando os objectivos propostos nesta dissertação, achou-se pertinente fazer uma breve abordagem aos conceitos envolvidos na determinação do risco natural, nomeadamente da susceptibilidade, perigosidade e vulnerabilidade. Não sendo possível obter todos os elementos para a determinação dos vários factores que integram o risco, a informação relativa à susceptibilidade do território à ocorrência de movimentos de vertente é fundamental na localização do risco, pois permite perceber quais as áreas onde podem ocorrer estes eventos e quais os elementos expostos ou em risco presentes nessas mesmas áreas.

##### 1. 4. 1. SUSCEPTIBILIDADE

O termo “*susceptibilidade*” de movimentos de vertente é muitas vezes confundido na literatura com o termo “*perigosidade*” (GUZZETTI, 2005). A susceptibilidade deve ser entendida como a probabilidade da ocorrência de um movimento em função de determinadas condições no terreno, ou seja, é avaliada pela correlação espacial que se



estabelece entre os factores de predisposição (e.g. declive, geologia, uso do solo) e a distribuição dos movimentos de vertente observados no território (BRABB, 1984; CROZIER e GLADE, 2005; GUZZETTI, 2005; THIERY *et al.*, 2007). O conceito, de susceptibilidade é também definido por ZÊZERE (2007, p. 17) como a “... *propensão do território à ocorrência de um tipo particular de movimento de vertente, com base nos factores condicionantes da instabilidade...*”. Já GUZZETTI *et al.* (2006) referem que a susceptibilidade traduz, matematicamente, a probabilidade espacial de ocorrência dos movimentos de vertente, em função de um determinado conjunto de condições geoambientais.

A susceptibilidade, ou “*propensão*” do território à ocorrência de movimentos de vertente, tem sido obtida por diferentes métodos, como por exemplo, determinação com base em vestígios de instabilidade (inventários de formas e depósitos de movimentos de vertente) ou simples avaliação subjectiva do investigador (GUZZETTI *et al.*, 1999).

Na avaliação da susceptibilidade a movimentos de vertente de uma determinada área, deve estar presente o conceito de Uniformitarismo, ou seja, é importante conhecer as condições que determinaram a instabilidade no passado e presente, partindo-se do pressuposto que no futuro, sob as mesmas condições, a probabilidade para ocorrer novos movimentos é elevada (VARNES, 1978; REIS *et al.*, 2003; GUZZETTI, 2005; EECKHAUT *et al.*, 2009). A importância da cronologia dos movimentos de vertente é reconhecida por LANG *et al.* (1999) como um elemento relevante no entendimento das causas que levaram à sua ocorrência, sendo um complemento da abordagem da avaliação da susceptibilidade.

Várias têm sido as metodologias propostas para a avaliação da susceptibilidade, como os métodos directos, baseados na cartografia geomorfológica, abordagens heurísticas ou classificações estatísticas provenientes de múltiplos modelos (GUZZETTI *et al.*, 1999; CHUNG e FABBRI, 1999; CLERICI *et al.*, 2002; GUZZETTI *et al.*, 2006).

Dos vários métodos existentes para a determinação dos graus de susceptibilidade do território a movimentos de vertente, destacam-se as técnicas de avaliação absoluta, baseadas nas características físicas do terreno e as técnicas de avaliação relativa baseadas, sobretudo, na distribuição dos movimentos de vertente e seu relacionamento com os factores condicionantes (GARCIA e ZÊZERE, 2003).

Segundo ZÊZERE (2005), a primeira técnica (avaliação absoluta) subdividem-se em três métodos:

- A. Investigações geotécnicas locais, determinando-se o factor de segurança de uma vertente, pela análise detalhada das características mecânicas, hidrológicas e geométricas do terreno;
- B. Modelos determinísticos, baseado nas leis físicas e mecânicas;
- C. Modelos probabilísticos, semelhantes aos determinísticos, mas com selecção dos parâmetros físicos e hidrológicos por funções probabilísticas.

Quanto ao segundo conjunto de técnicas (avaliação relativa), ZÉZERE (2005) considera uma subdivisão em dois métodos:

- A. Cartografia directa, apoiada na avaliação subjectiva atribuída pelo geomorfólogo, com base no seu conhecimento individual, onde há ponderação e determinação das combinações mais relevantes dos factores de instabilidade e posterior definição de situações de perigo;
- B. Cartografia indirecta, baseada na análise das causas da instabilidade e relações espaciais entre variáveis. Este método relaciona as unidades cartográficas previamente estabelecidas (e.g. matriciais, geológicas, geomorfológicas, topográficas e geo-hidrológicas) das variáveis independentes, com as manifestações de instabilidade também representadas espacialmente, sendo estas a variável dependente.

Este método contempla ainda dois subtipos: indexação, onde se atribui *scores* a um conjunto de factores de instabilidade passíveis de representação, possibilitando a obtenção de valores de susceptibilidade por operações matemáticas (soma ou multiplicação); e análise estatística, onde se relacionam os factores que condicionaram a instabilidade no passado e presente através de funções paramétricas empíricas, de onde resulta a predição quantificada da susceptibilidade a movimentos de vertente na totalidade do território em análise, mesmo nas áreas não instabilizadas. Os métodos estatísticos pode ser bivariados, como por exemplo o Método do Valor Informativo (VI) e multivariados, como é o caso da Análise Discriminante.

#### 1. 4. 2. RISCO

O risco é entendido como a “... *probabilidade de ocorrência de um processo (ou acção) perigoso e respectiva estimativa das suas consequências sobre pessoas, bens ou ambiente, expressas em danos corporais e/ou prejuízos materiais e funcionais, directos ou indirectos...*” (JULIÃO *et al.*, 2009, p. 22). A sociedade em geral está exposta a determinados tipos de riscos presentes no território e, não podendo estes ser completamente eliminados, podem ser reduzidos por aplicação de recursos adicionais (BELL e GLADE, 2004).

Para a determinação do risco são considerados os factores, perigosidade natural (fenómenos perigosos, como sismos, movimentos de vertente, cheias e inundações, entre outros) a vulnerabilidade (grau de perda de um elemento ou conjunto de elementos em risco, ou seja, população, construções, actividades antrópicas, entre outros, em resultado da ocorrência de uma manifestação de instabilidade de determinada magnitude; CROZIER e GLADE, 2005; HUFSCHMIDT *et al.*, 2005; ZÊZERE, 2005) e o valor dos elementos em risco (ZÊZERE, 2007a), conforme representado na Figura 1.6. O Risco obtém-se pela seguinte equação (ZÊZERE, 2005):

$$\textbf{Risco} = \text{Vulnerabilidade (V)} \times \text{Perigosidade (P)} \times \text{Elementos em risco (E)} \quad [1.3.]$$

A perigosidade é “...*a probabilidade da ocorrência de um fenómeno potencialmente destruidor, num determinado período de tempo, numa dada área...*” (ZÊZERE, 2005, p. 82). Segundo este autor há dificuldade em incorporar a componente temporal da perigosidade com a susceptibilidade, não se considerando nesta última, o período de recorrência do fenómeno.

Quanto à vulnerabilidade, esta traduz o grau de perda de determinado elemento em risco, em função da ocorrência de um determinado evento natural (CROZIER e GLADE, 2005; HUFSCHMIDT *et al.*, 2005). O grau de vulnerabilidade a que determinado elemento se encontra irá determinar as consequências e definir o grau de perda do mesmo, caso ocorra determinado evento com determinada magnitude. Este é expresso numa escala compreendida entre 0 (sem perda) e 1 (perda total), integrando-se nesta avaliação, a perda de bens, ou perda de vidas (GLADE e CROZIER, 2005).

A localização do risco resulta do cruzamento entre a probabilidade espacial de ocorrer determinado evento numa dada área (susceptibilidade) com os elementos em risco presentes.

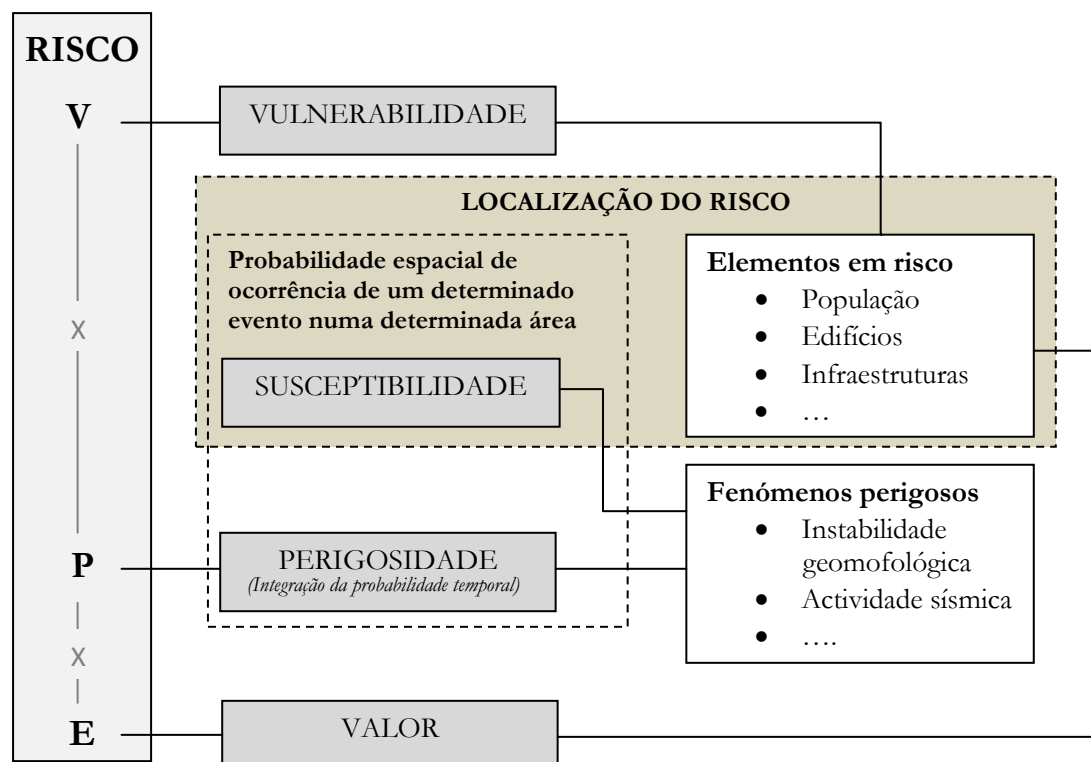


Figura 1.6. Modelo conceptual do risco natural (adaptado de ZÊZERE, 2005).

Desde a década de 90 do século passado, a análise do risco tem sido cada vez mais aplicada no contexto dos movimentos de vertente, no entanto, este nem sempre pode ser quantificado, face aos factores que o integram, optando-se nestes casos pela estimação qualitativa, com base na experiência de alguns técnicos, havendo sempre a presença de um grau de incerteza nem sempre quantificável com facilidade (HUFSCHMIDT *et al.*, 2005).

Em função dos vários mecanismos presentes em cada tipo de movimento e factores condicionantes, resultam diferentes comportamentos na movimentação do material afectado, facto que pode originar consequências distintas nos elementos atingidos. Inerentes a estes comportamentos estão as características físicas dos materiais afectados, o seu volume, velocidade de movimentação (importância do declive), teor de água presente, entre outros factores, tornando cada movimento único. É sob esta vertente individualista que a avaliação da susceptibilidade, perigosidade e risco deve ser feita de modo

independente para cada tipo de movimento de vertente, pois os comportamentos são distintos nas diferentes tipologias (FELL *et al.*, 2008).



## CAPÍTULO 2 - ENQUADRAMENTO DO CONCELHO DE TAROUCA

### 2.1. A GEOGRAFIA

O Concelho de Tarouca situa-se no Distrito de Viseu e apresenta uma área de 100,1 km<sup>2</sup> (Fig. 2.1). Localiza-se a Sul do Rio Douro e enquadra-se na denominada Região Natural da Beira Douro. Tem como concelhos limítrofes, a NW Lamego, a NE Armamar, a SW Castro Daire e a E/SE Moimenta da Beira. O Concelho de Tarouca é composto por dez freguesias (Dalvares, Gouveias, Granja Nova, Mondim da Beira, Salzedas, S. João de Tarouca, Tarouca, Ucanha, Várzea da Serra e Vila Chã da Beira), conforme representado na Figura 2.1.

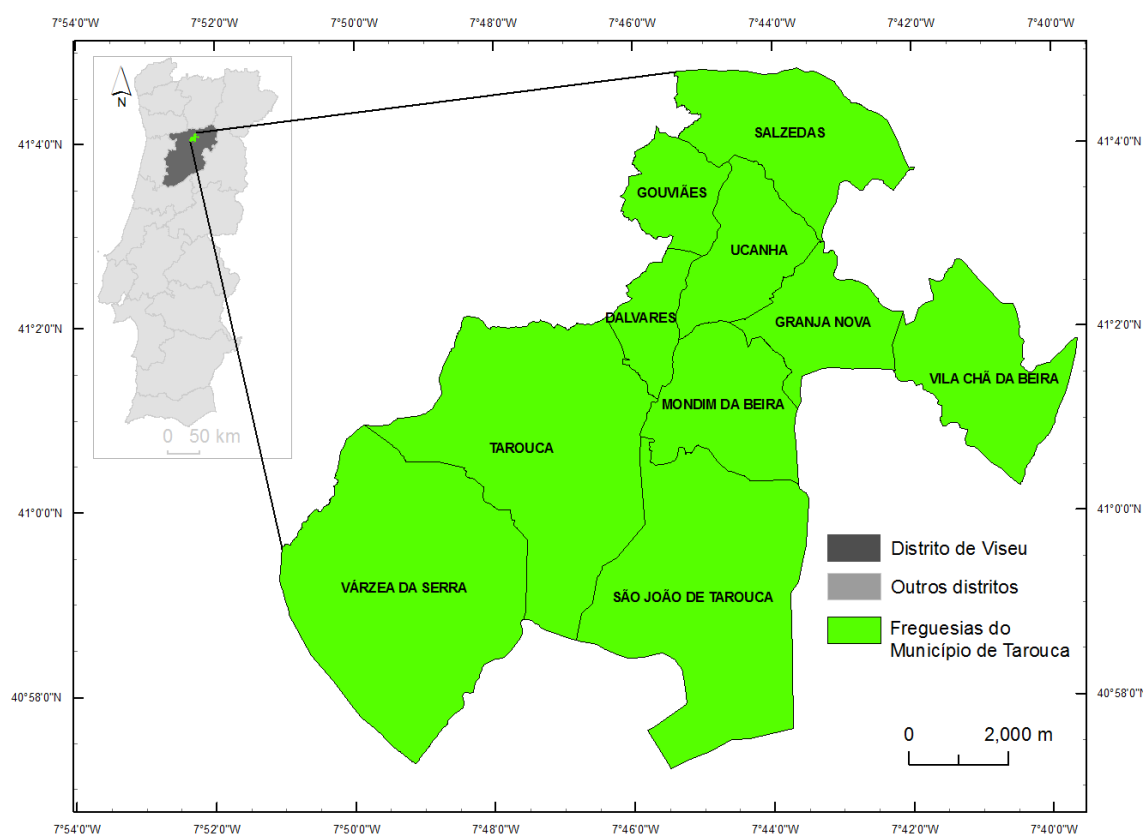


Figura 2.1. Enquadramento geográfico do Concelho de Tarouca.

## 2. 2. A GEOLOGIA

O Maciço Hespérico em Portugal integra as Zona Centro Ibérica (ZCI), de Ossa Morena, Sul de Portugal e os Terrenos Alóctones (FERREIRA, 2000). Inserindo-se a área de estudo na ZCI, é relevante compreender os seus aspectos geológicos fundamentais, devido à ligação existente entre os diversos granitóides que aqui afloram e a evolução geodinâmica desta unidade do Maciço Antigo, conforme referido por BATEIRA (2001). Este autor considera importante o estudo das características estruturais da ZCI, como a génese, a evolução e a caracterização químico-mineralógica dos diversos granitóides, na percepção da influência exercida destes elementos sobre a alteração das rochas e seus perfis, e a partir destes, analisar de que forma os factores litológicos podem contribuir para a ocorrência dos movimentos de massa.

Segundo FERREIRA (2000), a ZCI apresenta uma discordância do quartzito armoricano sobre uma sequência de tipo “*Flysch*” denominada por Complexo Xisto-Grauváquico, onde o metamorfismo regional é plurifacial. Este metamorfismo compreende os tipos de Barroviano e de Baixa-Pressão e está intimamente ligado aos níveis de intrusões de granitóides. O magmatismo sinorogénico desta Zona compreende, essencialmente, granitóides da série alcalina e da série calco-alcalina, onde as rochas básicas aparecem bastante subordinadas (FERREIRA, 2000).

A alteração destes granitóides deu origem à argila que constitui os mantos de alteração presentes na Europa, embora no NW da Península Ibérica, a percentagem de argila presente nestes mantos seja bastante reduzida (BATEIRA, 2001).

A quantidade desta componente fina (argila) é considerada um factor fulcral para a ocorrência dos movimentos de massa (FERREIRA, 1978). A porosidade e a permeabilidade das rochas presentes têm um papel decisivo na penetração e circulação da água (BATEIRA, 2001). A permeabilidade deve ser analisada à escala do afloramento (macrofissuração) mas, também, à micro escala (microfissuração), ou seja, ao nível dos minerais que constituem as rochas aflorantes. A alteração dos granitóides está, em sentido lato, dependente do grau de fracturação, factor responsável pelo desenvolvimento dos mantos de alteração (BATEIRA, 2001).

Segundo FERREIRA e SOUSA (1994), a área a SW da Serra de Santa Helena (localidade de Várzea da Serra) apresenta uma geologia diferenciada da generalidade do Concelho, sublinhando a coincidência com a região essencialmente xistenta marcada no Mapa



Geológico de Lamego. Há, porém, outros afloramentos de manchas xistentas, como é o caso da mancha encravada no granito porfiróide de grão médio a N e NE de Tarouca que se prolonga até à Ribeira de Tarouca (Fig. 2.2). A Sul de Gondomar, uma localidade da Freguesia de Tarouca, há um afloramento de uma pequena crista de quartzitos com bilobites, com a direcção NW-SE.

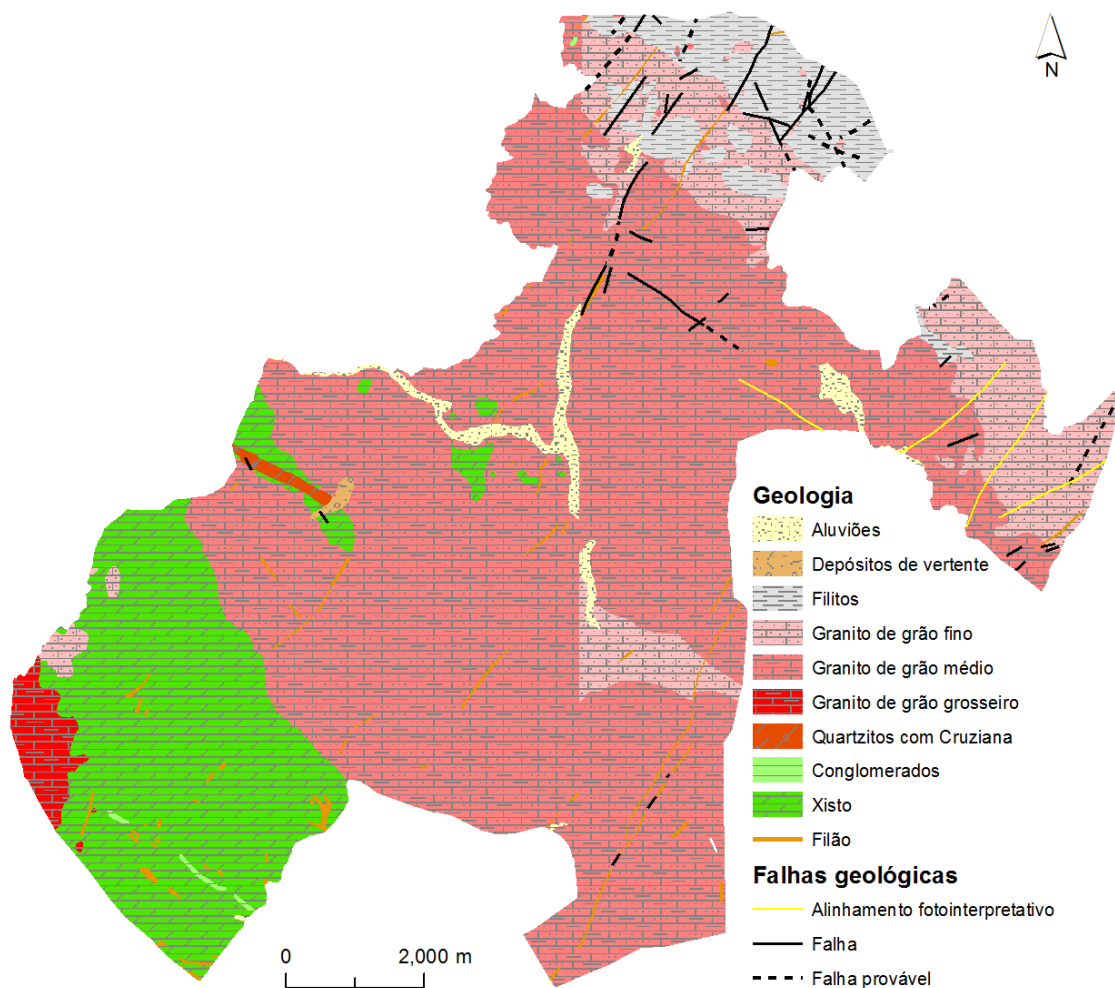


Figura 2.2. Mapa geológico simplificado do Concelho de Tarouca (adaptado das Folhas 14-A (Lamego) e 14-B (Moimenta da Beira), Carta Geológica de Portugal, à escala 1:50 000).

É de referir que a litologia dominante na área compreendida por este concelho é, essencialmente, de composição granítica, cortada por diversos filões que ocupam os sistemas de fracturas existentes, em várias direcções (FAVAS, 2008). São granitos orogénicos (Tarditectónicos), subdivididos em granitos de duas micas e granitos biotíticos. Estes dois grupos tiveram a sua instalação condicionada na região durante a 3ª fase de

deformação hercínica regional, o que originou a instalação de diferente fácies (FERREIRA e SOUSA, 1994).

As vertentes a N da Serra de Santa Helena inseridas na mancha xistenta estão cobertas por depósitos de vertente e apresentam declives moderados a acentuados, factor que pode fazer com que os deslizamentos iniciais que aqui possam ocorrer evoluam rapidamente para escoadas lamacentas (ZÉZERE *et al.*, 2007). A presença de rochas metassedimentares a N do Concelho propicia a ocorrência dos mesmos movimentos mencionados anteriormente, principalmente nas vertentes com declive mais acentuado do Monte Raso (vertentes voltadas para o Rio Varosa), área com grandes alterações da camada superficial do substrato rochoso, o que eleva a probabilidade de ocorrência de deslizamentos.

### 2.3. A GEOMORFOLOGIA

As formas de relevo do Maciço Antigo são predominantemente “...*superfícies de aplanamento, mais ou menos dissecadas pela erosão fluvial quaternária ou deslocadas pela tectónica terciária e quaternária...*” (FERREIRA e FERREIRA, 2004, p.14). Os planaltos fragmentados que constituem este relevo têm várias extensões e elevações, onde as diferentes altitudes entre planaltos são o resultado de acidentes topográficos, estando alguns deles cortados por vales (BIROT, 1975).

A área abrangida pela Carta Geológica 14A (Lamego), na qual se insere parte do Concelho de Tarouca, é classificada como “...*montanhosa e acidentada, com relevos ásperos e vales estreitos, alguns deles de percurso rectilíneo, a denunciar acidentes tectónicos...*” (TEIXEIRA *et al.*, 1969, p.7). Estes autores destacam a Serra de Santa Helena pela sua elevação e pela sua natureza granítica mas evidenciam, sobretudo, as vertentes íngremes para o lado de Tarouca, com declives superiores a 25°, um factor de instabilidade segundo ZÉZERE *et al.* (2007).

A freguesia de Várzea da Serra, localizada a SW desta serra, apresenta um relevo distinto da restante área de estudo. Esta insere-se na designada superfície fundamental, uma área de aplanção poligénica da Meseta (SOLE, 1952; citado por FERREIRA e SOUSA, 1994), apresentando assim, declives pouco acentuados. A paisagem de lombas e cabeços arredondados aqui presente deve-se ao facto de esta área ser essencialmente xistenta e apresentar uma dissecação acentuada. As rochas impermeáveis favorecem o desenvolvimento de uma rede hidrográfica densa (FERREIRA e FERREIRA, 2004),

conforme se pode observar na Figura 2.3, pela rede de drenagem extraída no ILWIS a partir do modelo numérico de elevação (MNE). Segundo RIBEIRO (1940), as superfícies de aplanamento bem conservadas nestas áreas têm tendência a desaparecer e as escarpas de falha degradam-se rapidamente.

Algumas das saliências semi-rectilíneas visíveis na paisagem são cristas correspondentes a filões quartzosos que preencheram algumas fracturas, daí o seu alinhamento, expostos actualmente devido à erosão diferencial (FERREIRA e SOUSA, 1994). Estas cristas podem encontrar-se na vertente da Serra de Santa Helena voltada para a Cidade de Tarouca, em S. João de Tarouca e nas vertentes do Monte Raso (Salzedas).

É de referir o elevado contraste entre as altitudes na área de estudo. Destacam-se a S e SW as áreas com as altitudes mais elevadas, na ordem dos 700m a 1100m, enquanto a N e NW, a altitude é inferior, compreendida entre os 300m e 700m. O vale do Rio Varosa compreende grande parte destas áreas de menor altitude. Este vale está bem demarcado na orografia deste Concelho, não só pela sua imponência quanto ao encaixe, mas pela sua extensão de vários km condicionada pela estrutura geológica. Com menor expressão, apresenta-se o Vale da Ribeira de Tarouca e o Vale de Salzedas, por onde escoam o Rio Torno.

O Rio Varosa nasce na região de xistos metamórficos de Várzea da Serra e é bastante meandrizado, apresentando, segundo FAVAS (2008), um caudal reduzido durante o período seco e bastante torrencial no período de maior precipitação. Circula por vales estreitos, principalmente a jusante de Dalvares e Gouviães, com excepção do vale mais amplo próximo a Dalvares (Ponte Nova) e Mondim da Beira, áreas ocupadas essencialmente por aluviões (TEIXEIRA *et al.*, 1969). Devido ao entalhe originado por este rio, acentuou-se a degradação da superfície fundamental (FERREIRA e SOUSA, 1994).

Quanto à Ribeira de Tarouca (também conhecida por Varosela), esta nasce na mesma área que o Rio Varosa, mas ao contrário deste, escoam pelo N da Serra de Santa Helena, encontrando-se os dois cursos de água na freguesia de Mondim da Beira. Segundo FERREIRA e SOUSA (1994, p.8), a direcção das linhas de água tem grande coincidência com o sistema de fracturação principal NNW-SSE, destacando-se, também, as direcções N-S e NNE-SSW, como se pode verificar na Figura 2.3.

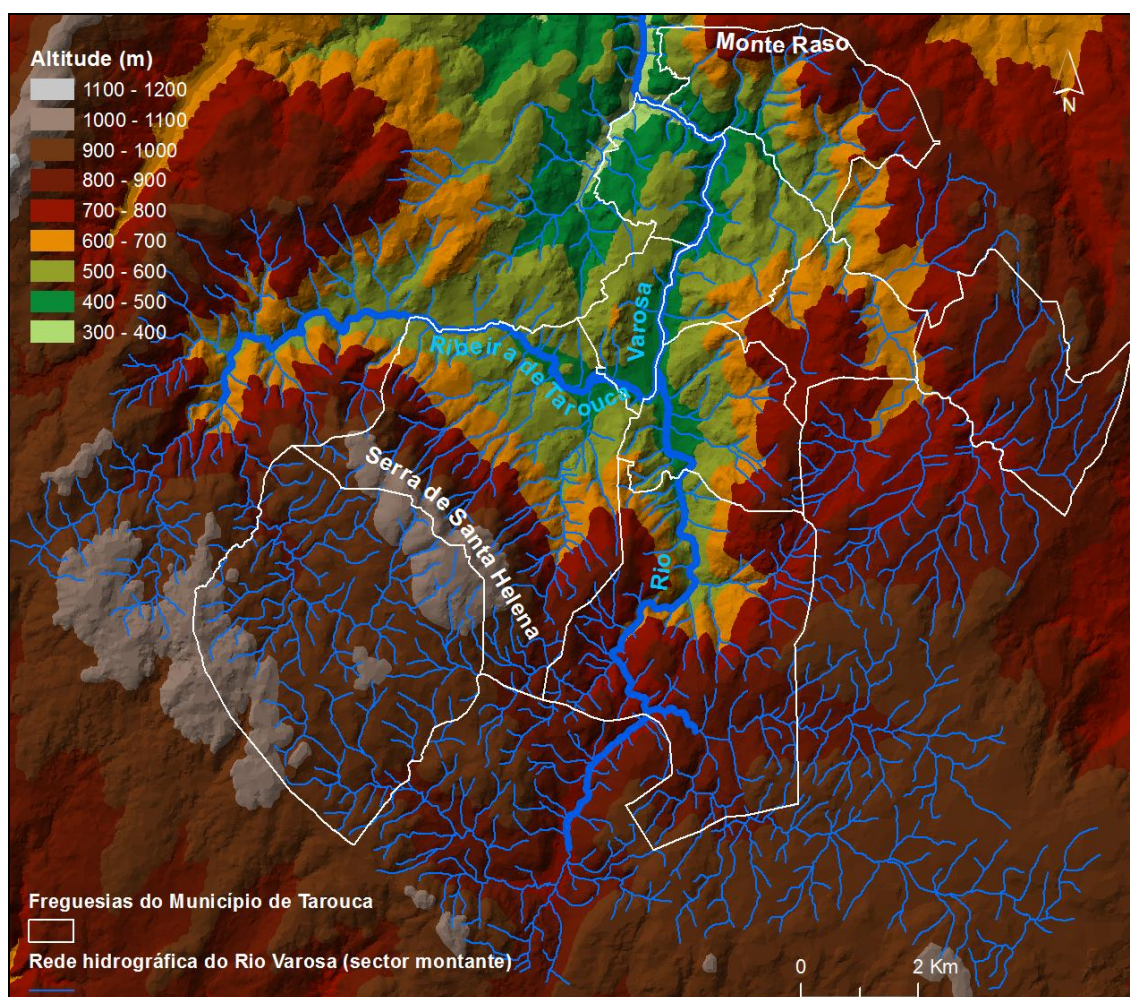


Figura 2.3. Relevo da área de estudo com sobreposição da rede de drenagem do Rio Varosa.

## 2. 4. O CLIMA

O clima onde se insere a área de estudo é classificado por DAVEAU *et al.* (1985) como continental, acentuado pela posição topográfica. Segundo estes autores, os verões são moderados (23° a 29° C) e os invernos frios (mínimo médio do mês mais frio entre 1° e 2° C), com excepção das áreas mais elevadas, onde o inverno é muito frio (mais de 40 dias com temperatura mínima inferior a 0° C). Quanto à precipitação, esta área é influenciada pelo condicionamento das barreiras montanhosas de Montemuro e do Marão-Alvão, elementos que marcam a transição do clima marítimo para o continental e proporcionam efeito de abrigo às áreas a Este, pela formação de um V aos ventos marítimos húmidos que circulam de Oeste para Este (PEDROSA *et al.*, 2004).

Pelos dados de precipitação disponibilizados no SNIRH da única estação meteorológica que existiu no concelho (período de funcionamento 1933 a 1996), verifica-se grande variabilidade interanual, com valor médio de 1103,4 mm.

## 2. 5. A OCUPAÇÃO ANTRÓPICA

A determinação de áreas susceptíveis a movimentos de vertente assume maior importância, quando está em causa a vida das pessoas ou bens materiais. Neste contexto, é fundamental conhecer a fixação da população e das suas actividades, bem como as áreas onde se localizam os bens materiais com algum valor (estratégico, económico, cultural, estético, arquitectónico) para se poder planear o território de forma mais coerente, mas sobretudo evitar a ocupação ou adensamento de áreas com elevada susceptibilidade a movimentos de vertente, através da implementação de medidas de política preventivas.

Com base nos Censos de 2001, a população deste concelho totalizava 8325 habitantes mas, face à dinâmica populacional e ao período de tempo entretanto passado, é possível que o número de habitantes se tenha alterado substancialmente.

Relativamente à distribuição da população, esta é pouco uniforme. Tarouca apresenta uma área de 19,68 km<sup>2</sup> e é a freguesia que apresenta mais habitantes (3416), no entanto, a densidade populacional é inferior à de Dalvares, uma freguesia com menos habitantes (621) e uma área mais reduzida (3,04 km<sup>2</sup>), justificando-se, assim, a densidade mais elevada desta última, quando comparada com as restantes freguesias do concelho (Fig. 2.4).

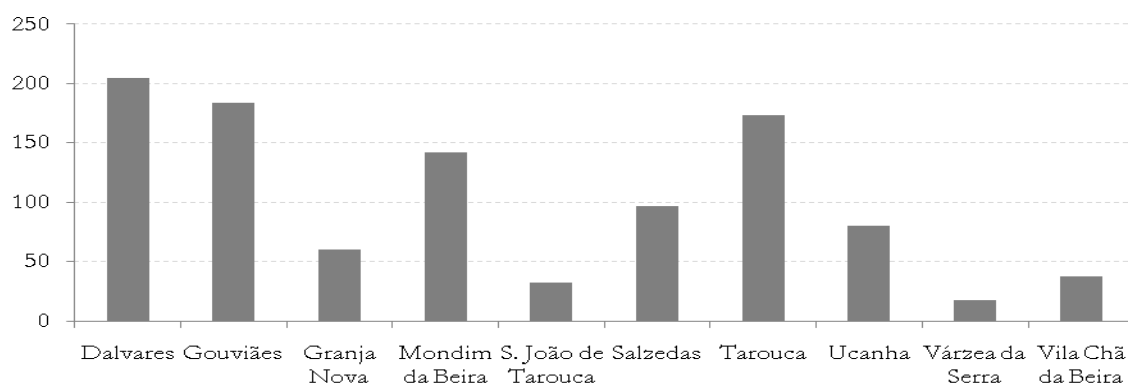


Figura 2.4. Densidade populacional (Hab./km<sup>2</sup>) em 2001 (baseado nos Censos de 2001 do INE).

A construção em vertentes com declive acentuado pode constituir-se como um factor que eleva o risco total na análise do risco geomorfológico (e.g. movimentos de vertente). Em alguns sectores das vertentes da Serra de Santa Helena voltadas para Tarouca, a construção é significativa no território. Nesta área existem vários registos de prejuízos causados por movimentos de vertente, nomeadamente a obstrução da E.N. 530, com os detritos da escoada que ocorreu em 2006 e, também, danos estruturais em habitações aqui construídas, provocados por alguns deslizamentos.

No Vale do Varosa destacam-se alguns aglomerados de construções nas áreas com forte declive (e.g. Ucanha, São João de Tarouca), muitas delas com alguma idade, constituídas apenas de blocos de granito sobrepostos, o que se constitui como uma fragilidade face a um eventual episódio de instabilidade geomorfológica. Nas vertentes deste vale também se destaca a ocupação habitacional dispersa, com algumas construções localizadas em patamares antrópicos ou em vertentes regularizadas, utilizadas em paralelo para o desenvolvimento de actividades agrícolas.

O abandono habitacional é notável, nomeadamente, das casas mais antigas, encontrando-se actualmente algumas delas em elevado estado de degradação. Este facto tem maior expressão nas construções junto ao curso de água no sector jusante do Rio Varosa, onde muitas casas estão degradadas e isoladas, com alguns vestígios de danos estruturais, causados por blocos que rolaram de desabamentos ocorridos nos afloramentos rochosos situados nas secções montante das vertentes.

## CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

### 3.1. RECOLHA DE INFORMAÇÃO

Neste ponto é descrito como se recolheu toda a informação, desde a inventariação dos movimentos de vertente, à sua validação no terreno e toda a informação complementar, nomeadamente a informação georreferenciada utilizada na modelação da susceptibilidade e localização do risco.

#### 3.1.1. INVENTARIAÇÃO DE MOVIMENTOS DE VERTENTE

A inventariação de movimentos de vertente pode fazer-se a partir de várias técnicas, tais como: análise e interpretação de fotografias aéreas (CARRARA *et al.*, 1992; GUZZETTI *et al.*, 1999; HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008) podendo estas estar corrigidas (ortofotomapas) ou não; exploração de imagens de satélite a partir da Detecção Remota (DR); com base em cartografia geomorfológica e, também, pela monitorização superficial e sub-superficial de vertentes instáveis (ARDIZZONE *et al.*, 2007). As fontes documentais, como os jornais, livros, relatórios técnicos, entre outros, permitem identificar, temporal e espacialmente, determinados eventos geomorfológicos mas, também, obter informações complementares, nomeadamente o número de mortes, identificação de prejuízos materiais e custos associados. GUZZETTI *et al.* (1999) consideram estas fontes documentais fundamentais para a avaliação da susceptibilidade a movimentos de vertente. A informação obtida junto da população também deve integrar esta avaliação; embora possa ser vaga e imprecisa, constitui-se como testemunho da dinâmica de vertentes.

Nesta dissertação, recorreu-se aos ortofotomapas de 2005 e 2008, cedidos pela Câmara Municipal de Tarouca (CMT), para a identificação de alguns movimentos. Com elevada resolução (0,5m), estes permitiram a visualização de formas de instabilidade, bem como diferentes texturas, alterações na vegetação, interrupções de culturas em áreas agrícolas, resultantes dos movimentos de vertente. A partir destes dados identificaram-se, essencialmente, possíveis escoadas e deslizamentos. Na Figura 3.1 pode observar-se o local onde começa o movimento (ruptura) e as áreas de acumulação de detritos no fundo de vale. Quanto aos deslizamentos, identificaram-se alguns em áreas com intervenção



antrópica, nomeadamente áreas de socacos com os muros que os sustentam totalmente destruídos, áreas de plantações arbóreas (pinhal, olival, pomares), sendo visíveis as interrupções dos alinhamentos das árvores destruídas por movimentos de vertente. As vinhas são bons elementos de identificação de movimentos de vertente pelo alinhamento contínuo das videiras, sendo que a interrupção destes alinhamentos denuncia possíveis instabilidades. Alguns dos movimentos identificados a partir destes dados, quando confrontados com a altimetria (equidistância 5m) cedida pela CMT, foram eliminados devido ao contexto topográfico em que se encontravam.



Figura 3.1. Exemplo de movimentos de vertente identificados a partir da análise dos ortofotomapas.

A - deslizamento translacional na freguesia de Vila Chã da Beira; B - escoada a SW da Serra de Santa Helena (freguesia de Tarouca); C - deslizamento com evolução para escoada na Serra de Santa Helena.

A altimetria permitiu, ainda, a identificação de alguns deslizamentos adicionais, através da identificação de mudanças repentinas no traçado das curvas de nível. Este método consiste na identificação das inflexões para montante nas áreas de depleção e inflexão das curvas com cota inferior para jusante, nos locais de acumulação do material deslizado (Fig. 3.2). Aqui, foram necessários os ortofotomapas para melhor identificação dos movimentos.

Recorreu-se, também, ao *Google Earth* para a identificação de outros movimentos não detectados a partir dos elementos referidos anteriormente. Esta ferramenta tem disponível informação detalhada do território em diferentes datas, muito útil para o trabalho aqui desenvolvido, nomeadamente para a determinação aproximada da data em que ocorreu determinado movimento de vertente. Pela comparação das fotografias aéreas corrigidas disponíveis (Outubro de 2002 e 2006 e Junho de 2010) identificou-se um deslizamento na localidade de Vilarinho. O polígono vectorizado naquela plataforma foi convertido em SHP, através de ferramentas de SIG *online*, de forma a permitir a sua inserção na base de dados dos movimentos obtidos com as técnicas de inventariação discriminadas



anteriormente. Este movimento, tal como os restantes, foi posteriormente validado no campo.



Figura 3.2. Deslizamento identificado a partir do traçado das curvas de nível no Monte Raso (Salzedas).

Na Figura 3.3 estão ilustrados alguns dos movimentos encontrados no campo, onde é possível observar alguns danos estruturais resultantes destes eventos, nomeadamente, muros destruídos (imagem A). As culturas agrícolas também são afectadas, designadamente, vinhas e olivais. Na Figura 3.3 pode observar-se ainda a obstrução de estradas pelo material deslizado (imagens B, D e E), algumas delas fundamentais para o acesso a habitações, como é o caso das estradas de Vila Pouca e de Gouviães (imagens B e D, respectivamente). A constatação de alguns movimentos na Serra de Santa Helena só foi possível devido à exposição das áreas instabilizadas. Estas encontram-se sem cobertura vegetal devido à ocorrência de um incêndio recente, denunciando a instabilidade geomorfológica das vertentes. Nas áreas com elevada densidade vegetal, o reconhecimento de movimentos torna-se um processo mais complexo, principalmente no caso dos movimentos mais antigos.

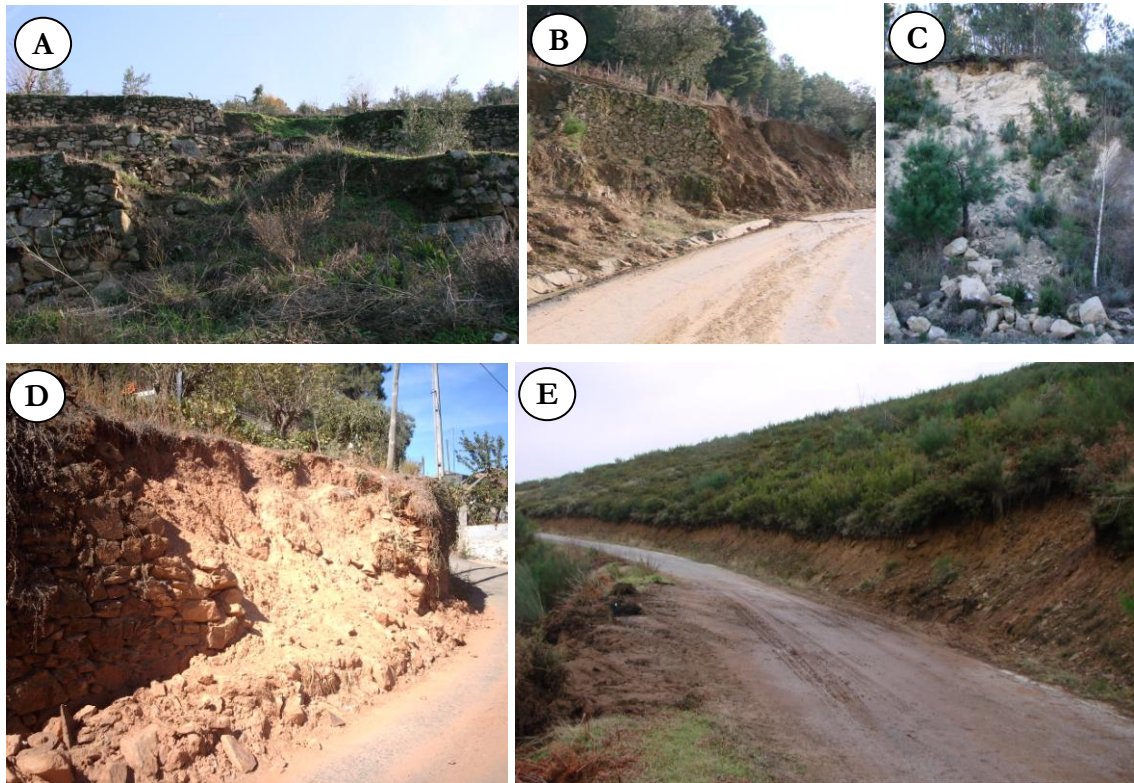


Figura 3.3. Deslizamentos identificados em trabalho de campo.

A – socacos destruídos devido a um deslizamento na localidade de Vila Pouca (Salzedas); B – deslizamento junto à estrada municipal de acesso à povoação de Vila Pouca; C – deslizamento junto ao cruzamento da E.N. 329 com a E.N. 1072 (freguesia de São João de Tarouca); D – deslizamento no lugar do Barreiro (Gouveães); E – deslizamento junto à estrada de acesso ao Cristo Rei (Serra de Santa Helena).

### 3. 1. 2. VALIDAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE INVENTARIADOS

O trabalho de campo é indispensável na avaliação da susceptibilidade a movimentos de vertente, pois todos os indícios de áreas instabilizadas identificadas de forma indirecta têm de ser validados no local. O reconhecimento de movimentos de vertente presencialmente na área em estudo é uma mais-valia, pois são identificados movimentos de difícil identificação por outros meios (e. g. observação de ortofotomapas), não só pela dimensão da área afectada, mas também pela dissimulação sob o coberto vegetal. Muitos dos movimentos encontrados ocorreram em áreas com intervenção antrópica, nomeadamente, rompimento dos taludes para a construção de estradas ou regularização da vertente para a prática agrícola.

Assim, para a validação dos movimentos identificados em gabinete fez-se trabalho de campo, identificando-se nestas campanhas outros movimentos de menor dimensão, não detectados na análise dos ortofotomapas e da altimetria, como referido anteriormente. A informação da população local foi essencial na localização de alguns destes movimentos e, também, na determinação da data da sua ocorrência. A localização destes movimentos encontrados nas campanhas de campo registou-se com recurso a GPS e, posteriormente, foi inserida na base de dados onde consta a variável dependente (áreas instabilizadas). Todos os movimentos validados foram alvo de descrição exaustiva na ficha de levantamento de campo (Anexo 1) adaptada de ZÉZERE (1997).

A vegetação constitui um elemento fundamental para a validação de movimentos de vertente, principalmente dos mais antigos. Pela deformação dos troncos, em função do movimento de massa, pode identificar-se o plano de ruptura e determinar a tipologia do movimento (Fig. 3.4).

No deslizamento rotacional as árvores localizadas no auge resultante do movimento, apresentam troncos com curvatura oposta às que se localizam sobre o corpo da massa deslizada (sector de acumulação). Na superfície que separa o terreno não afectado do material deslocado constituinte do pé do deslizamento (sector a jusante do plano de ruptura), podem encontrar-se alguns troncos cortados e árvores tombadas (enterradas ou semi-enterradas) pelo material deslocado.

No deslizamento translacional superficial, a vegetação apresenta geralmente curvatura do tronco apenas num sentido.

Já as escoadas, sendo movimentos superficiais, podem danificar a vegetação na sua passagem deixando-a tombada no sentido do movimento, podendo esta estar parcialmente ou totalmente arrancada do solo. No sector de acumulação de detritos muita da vegetação encontra-se enterrada pelo material deslocado.

Nos desabamentos, os blocos em movimento, dependendo do seu volume, velocidade com que atingem determinado elemento físico e capacidade de resistência deste, são bastante destrutivos. A vegetação atingida, geralmente, fica completamente destruída, no entanto, os troncos partidos permanecem no local e são um elemento chave na identificação do percurso dos blocos durante o seu movimento.

Segundo LANG *et al.* (1999), é possível datar os movimentos de vertente a partir da análise dos anéis deformados dos troncos danificados pelo movimento de massa (dendrocronologia).

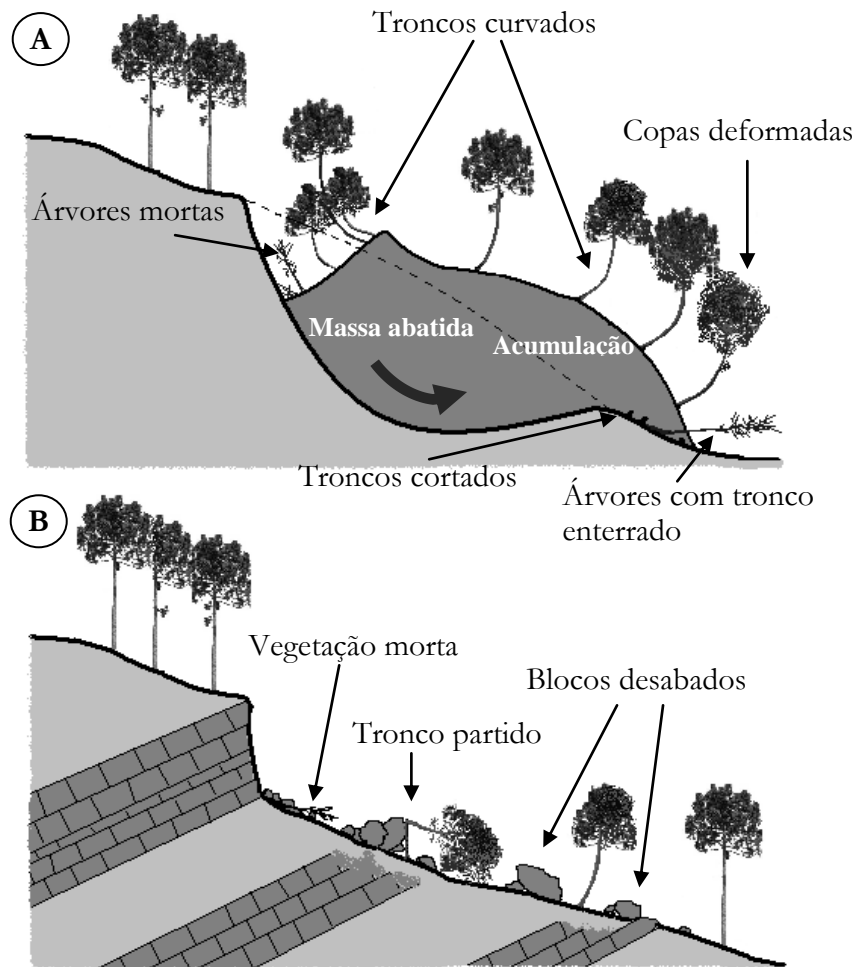


Figura 3.4. Identificação de movimentos a partir da vegetação deformada ou danificada.

A – vegetação deformada em função do movimento de massa num deslizamento rotacional; B – vegetação destruída por blocos desabados.

Na validação dos movimentos de vertente, teve-se em conta todos os indícios encontrados na vegetação imputáveis à instabilidade das vertentes. As características mais comuns observadas foram os troncos das árvores partidos e inclinados e, também, alguns troncos semi-enterrados. Esta técnica foi útil na validação de movimentos mais antigos, que ocorreram em áreas ocupadas por pinheiros e, também, de alguns movimentos ocorridos em áreas agrícolas abandonadas (Fig. 3.5).





Figura 3.5. Validação dos movimentos de vertente a partir das características físicas da vegetação.

A - deslizamento que ocorreu a SW da localidade de Almodafa (Mondim da Beira), sendo visível pinheiros bravos inclinados na direcção da deslocação do material;

B - deslizamento num pomar de cerejeiras abandonado em Eira-Queimada (Gouveias), com as árvores semi-enterradas pelo material deslizado.

### 3. 1. 3. INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA UTILIZADA NA MODELAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE. RECOLHA DE DADOS COMPLEMENTARES PARA CORRECÇÃO DO MODELO DIGITAL DE TERRENO

Alguns dos dados espaciais utilizados foram cedidos pela CMT, nomeadamente a altimetria, ortofotomapas, edificado e rede viária, enquanto outros foram adquiridos através de recolha directa no campo e em gabinete, como referido anteriormente.

Com recurso aos SIG, compatibilizou-se toda a informação georreferenciada em formato digital e guardou-se numa base de dados criada para este fim. A criação deste tipo de bases de dados permite, na investigação de movimentos de vertente, fazer uma análise dos dados, tanto ao nível espacial, como temporal (DIKAU *et al.*, 1996).

No ArcCatalog criaram-se várias *shape files* (SHP) importadas posteriormente para a *feature dataset* existente no interior da referida base de dados. Já no ArcMap, utilizou-se uma destas *feature class* para se proceder à vectorização dos polígonos referentes aos movimentos de vertente, tendo em conta as observações feitas sobre os ortofotomapas, fazendo-se neste ponto somente a distinção entre escoadas e deslizamentos. As outras *feature class* serviram para a vectorização da informação em formato *raster* (e.g. pontos cotados das cartas militares) e, também, da informação convertida do formato analógico para *raster* (e.g. cartas geológicas digitalizadas).

A construção de modelos em SIG apresenta diversas vantagens, nomeadamente a disponibilização a terceiros da metodologia utilizada, constituindo-se uma mais-valia, pois permite maior rentabilidade no tempo da execução de determinados ensaios, desde que se possuam as mesmas variáveis de entrada. Por serem modelos abertos, é possível modificar os parâmetros das variáveis no decorrer dos vários processos (análises, reclassificações, conversões), sem que, para tal, se tenha de obter nova informação. Assim, construiu-se um modelo no ArcCatalog, considerado uma forma eficaz de perceber os vários processos utilizados. Adicionalmente, este modelo permite manipular a informação disponível, com a vantagem de se poder demonstrar esquematicamente a metodologia utilizada nos SIG (Anexos 2, 3 e 4).

A partir das curvas de nível elaborou-se o primeiro MNE no *software* ILWIS. Este foi submetido a várias correcções, devido a diversas imperfeições geradas na sua concepção, utilizando-se neste processo, os pontos cotados obtidos a partir das Cartas Militares (1:25000). A recolha destes pontos foi insuficiente para a melhoria do modelo, recorrendo-se à obtenção de pontos críticos a partir do *software* Idrisi, de forma a completar a informação até aqui adquirida. A utilização deste método requer o conhecimento prévio da área em estudo, pois os atributos dos pontos criados (altitude) são obtidos através da criação de uma parábola (método polinomial não linear) no Idrisi, um *software* que combina a simplicidade de cálculo e compatibilidade com a maioria das superfícies topográficas (EASTMAN, 2006). A parábola criada, segundo o autor anteriormente mencionado, obtém-se a partir da seguinte equação:

$$(X-a)^2 = 2p(Y-b) \quad [3.1]$$

Onde:

$a$ ,  $b$ , corresponde ao ponto do centro da parábola (posterior ou inferior);  
 $p$  é o parâmetro que define o declive, ou seja o factor forma (quando este parâmetro é positivo a parábola é invertida (convexa), se for negativo apresenta-se sob a forma côncava (EASTMAN, 2006).

Como resultado da interpolação obtiveram-se os pontos críticos, correspondendo-lhes um atributo (valor de altitude), em função da distância (X) à origem (0) e à elevação (Y), conforme representado na Figura 3.6.

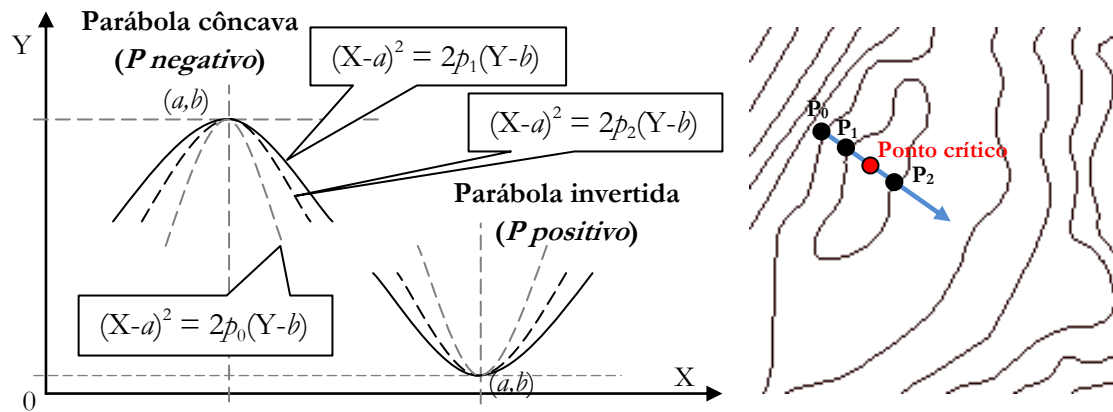


Figura 3.6. Parábolas resultantes da equação, para a obtenção de pontos críticos com exemplo à direita da intersecção de pontos numa determinada direcção (adaptado de EASTMAN, 2006).

Destes dados foram excluídos os pontos gerados em áreas planas, daí a necessidade do conhecimento prévio da área a modelar, apurando-se um total de 56735 pontos. Com estas três variáveis (curvas de nível, pontos cotados das Cartas Militares e pontos críticos) gerou-se um novo modelo, apresentando este melhorias significativas, designadamente, topos de vertentes convexos e fundos de vale côncavos, mais próximos da realidade (Fig. 3.7). Deste modelo resultaram diversas variáveis, particularmente os declives, exposições e curvatura das vertentes, elementos essenciais para a determinação das áreas susceptíveis a movimentos de vertente.

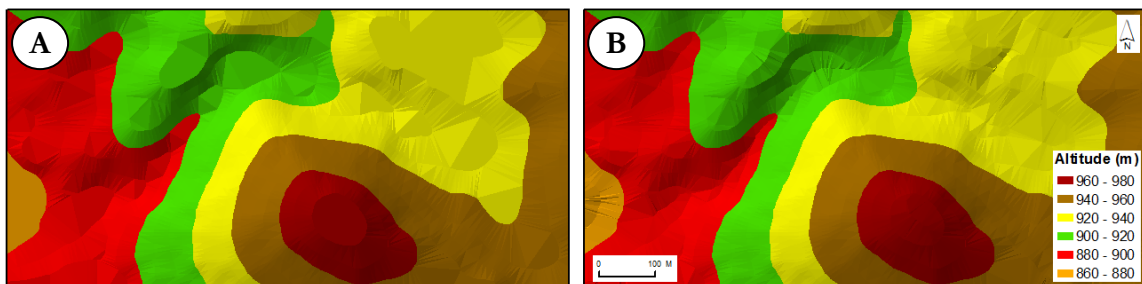


Figura 3.7. Comparação entre extracto do MDT do Concelho de Tarouca elaborado sem pontos críticos (A) e extracto do MDT elaborado com pontos críticos (B).

### 3.2. MODELAÇÃO E VALIDAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE

Nesta dissertação utilizaram-se duas técnicas estatísticas bi-variadas para determinar a susceptibilidade do território, sendo elas, o Valor Informativo (VI) e a Lógica *Fuzzy*.

Segundo ZÊZERE *et al.*, (2009), estes métodos têm o inconveniente de não considerar possíveis auto-correlações entre variáveis.

Estas técnicas foram aplicadas individualmente a cada tipo de movimento de vertente considerado (deslizamentos rotacionais, deslizamentos translacionais e escoadas). Não se considerou na modelação da susceptibilidade a única ocorrência de desabamento encontrada, pela reduzida expressão da amostra.

Para a utilização destes métodos, calcularam-se numa primeira fase do procedimento analítico as probabilidades condicionadas correspondentes a cada classe dos vários factores de predisposição. Estas probabilidades, segundo ZÊZERE *et al.* (2009), dão a indicação objectiva e quantificada da importância relativa de cada variável na distribuição dos movimentos. Estes podem obter-se a partir de uma das seguintes equações:

$$PC_{ji} = \frac{S_i}{N_i} \quad [3.2]$$

$$PC_{ji} = 1 - \left(1 - \frac{1}{\eta}\right)^\varepsilon \quad [3.3]$$

Sendo:

$PC_{ji}$  a probabilidade condicionada na classe  $i$  do mapa temático  $j$ ;  
 $S_i$  o número de unidades de terreno matriciais com movimentos de vertente na variável  $X_i$ ;  
 $N_i$  o número de unidades de terreno matriciais com a variável  $X_i$ ;  
 $\varepsilon$  a área deslizada na classe  $i$ ;  
 $\eta$  a área da classe  $i$ .

Para esta dissertação optou-se pela equação 3.2 para a determinação das probabilidades condicionadas.

Outro dado fundamental para a determinação da susceptibilidade é a probabilidade *a priori* de ocorrência de movimentos de vertente. Esta traduz a probabilidade de uma unidade de terreno (neste caso pixel com a resolução de 10m) conter movimentos de vertente, sem considerar os factores condicionantes (THIERY *et al.*, 2007). Para a sua estimativa utiliza-se o total de unidades de terreno instabilizadas e o total das unidades de terreno da área de estudo. Assim, a probabilidade *a priori* obtém-se pela seguinte expressão:

$$Pp = \frac{S}{N} \quad [3.4]$$

Correspondendo:

$Pp$  a probabilidade *a priori* de ocorrência de movimentos de vertente;  
 $S$  o número total de unidades de terreno matriciais com movimentos de vertente;  
 $N$  o número total de unidades de terreno matriciais da área de estudo.



### 3. 2. 1. MÉTODO DO VALOR INFORMATIVO

O Valor Informativo (VI) é um método estatístico que pressupõe a definição prévia de unidade de terreno (matriciais ou outras) e a consideração de um conjunto de factores que controla a resposta da variável dependente (MELO *et al.*, 2010). Este resulta da normalização logarítmica da razão entre a probabilidade condicionada e a probabilidade *a priori*, e traduz a susceptibilidade de cada classe de cada variável independente nos diferentes tipos de movimentos de vertente.

Na determinação do VI para cada variável independente, utilizou-se a seguinte equação (YIN e YAN, 1988):

$$I_i = \ln \frac{PC_{ji}}{Pp} \quad [3.5]$$

Sendo:

$I_i$  o Valor Informativo;

$PC_{ji}$  a probabilidade condicionada de ocorrência de movimentos do tipo  $y$  na classe  $i$  do mapa temático  $j$ ;

$Pp$  a probabilidade *a priori* de ocorrência de movimentos do tipo  $y$ .

Na determinação da susceptibilidade final considerou-se os VI das várias variáveis independentes obtidos pela equação anterior. Estes representaram-se espacialmente em formato matricial, de forma a permitir o seu somatório para obter o VI total para cada pixel, através da seguinte equação:

$$I_j = \sum_{i=0}^n X_{ij} I_i \quad [3.6]$$

Sendo:

$I_j$  o Valor Informativo total no pixel  $j$ ;

$I_i$  o Valor Informativo de cada pixel de cada variável independente;

$n$  o número de variáveis;

$X_{ij}$  assume o valor 1 ou 0 consoante a presença ou não da variável na unidade de terreno.

### 3. 2. 2. MÉTODO DA LÓGICA FUZZY

A metodologia da Lógica *Fuzzy*, ou Lógica Difusa, desenvolvida por ZADEH (1965), admite a variação entre 0 e 1 (ou 0 e 100%) de um elemento existente num determinado conjunto, sendo este expresso por um valor de associação *fuzzy*, ou *fuzzy membership*.

Segundo BONHAM-CARTER (1996) e ZÉZERE *et al.* (2009), a atribuição de valores de *fuzzy membership* a cada variável é feita tipicamente a partir da avaliação subjectiva (*expert opinion*) da sua importância no modelo de susceptibilidade, daí este ser considerado um método heurístico e não estatístico.

No entanto, no presente trabalho a determinação dos valores de *fuzzy membership* para cada classe das variáveis independentes consideradas, foi feita de forma objectiva, ou seja, calculou-se a sua importância em proporção a cada probabilidade condicionada calculada pelo método descrito anteriormente. Destas probabilidades achou-se o valor máximo do conjunto das variáveis independentes e, a partir deste, calculou-se para cada classe, o respectivo valor de *fuzzy membership*, sendo este o produto resultante da divisão da respectiva probabilidade condicionada pelo valor máximo encontrado anteriormente. Estes valores inseriram-se na tabela de atributos das várias variáveis independentes (em formato *raster*) e, posteriormente, procedeu-se à “fuzificação” (*fuzzification*) utilizando a ferramenta *Spatial Data Modeller* (ArcSdm) no ArcGIS 9.3.

Existem vários operadores para combinação dos valores “fuzificados”. AN *et al.* (1991) fazem referência a cinco operadores para estas combinações, sendo eles, o *Fuzzy AND*, *Fuzzy OR*, *Fuzzy Algebraic Product*, *Fuzzy Algebraic Sum* e *Fuzzy Gamma*.

Nesta dissertação optou-se pela utilização dos operadores *Fuzzy Sum* (soma algébrica) e *Fuzzy Gamma*, de acordo com as seguintes equações (BONHAM-CARTER, 1996):

$$Fuzzy\ Sum = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \quad [3.7]$$

$$Fuzzy\ Gamma = \left( 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right)^y \left( \prod_{i=1}^n \mu_i \right)^{1-y} \quad [3.8]$$

Onde:

- $\mu_i$  são os valores de associação *fuzzy* ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ) para as variáveis 1, 2, 3, ..., n;
- $n$  número de variáveis consideradas;
- $y$  parâmetro definido pelo operador.

No operador Sum o resultado é sempre superior ou igual ao valor “fuzificado” mais elevado considerado na análise (efeito crescente).

O operador *Fuzzy* Gamma resulta da combinação das funções dos operadores Sum e Algebraic Product. O operador Gamma, ao utilizar simultaneamente estes dois operadores, permite reduzir ou anular algumas fragilidades produzidas na utilização individual dos operadores Sum e Algebraic Product. O primeiro operador tende a fornecer valores combinados elevados de *fuzzy membership*, enquanto o operador Algebraic Product tem tendência para fornecer os valores mais baixos de *fuzzy membership* (LOPES, 2008).

Quanto ao parâmetro  $\gamma$ , este pode variar entre 0 e 1, sendo que, quando é igualado a 0, a combinação é a mesma que a do Algebraic Product; pelo contrário, se igualado a 1, a combinação é igual ao operador Sum (ZIMMERMANN e ZYSNO, 1980; BONHAM-CARTER, 1996; TAKÁES *et al.*, 2000).

### 3. 2. 3. VALIDAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE

Na validação da susceptibilidade a partir do VI, utilizaram-se duas técnicas: as taxas de sucesso e taxas de predição (Fig. 3.8). No primeiro método os resultados são validados com todos os movimentos que lhe deram origem, enquanto no segundo, há a partição da variável dependente de forma aleatória, servindo uma parte para fazer a modelação e a outra para validar os resultados obtidos (ZÊZERE, 2005).

Para cada método de avaliação da susceptibilidade (Valor Informativo e Lógica *Fuzzy*) construíram-se as respectivas curvas de sucesso. No caso do Valor Informativo foram ainda elaboradas as curvas de predição.

As curvas de sucesso e de predição são eficazes para avaliar qualitativamente os modelos estatísticos de avaliação da susceptibilidade, permitindo comparar de uma forma objectiva as diferenças entre cada um (ZÊZERE *et al.*, 2009), ao determinar a percentagem de área de estudo necessária para a explicação da percentagem de área afectada por determinado tipo de movimento. Contudo, as curvas de sucesso e de predição têm o inconveniente de permitir apenas a comparação visual entre modelos, sendo necessário recorrer a outro método para quantificar as diferenças entre cada um deles.

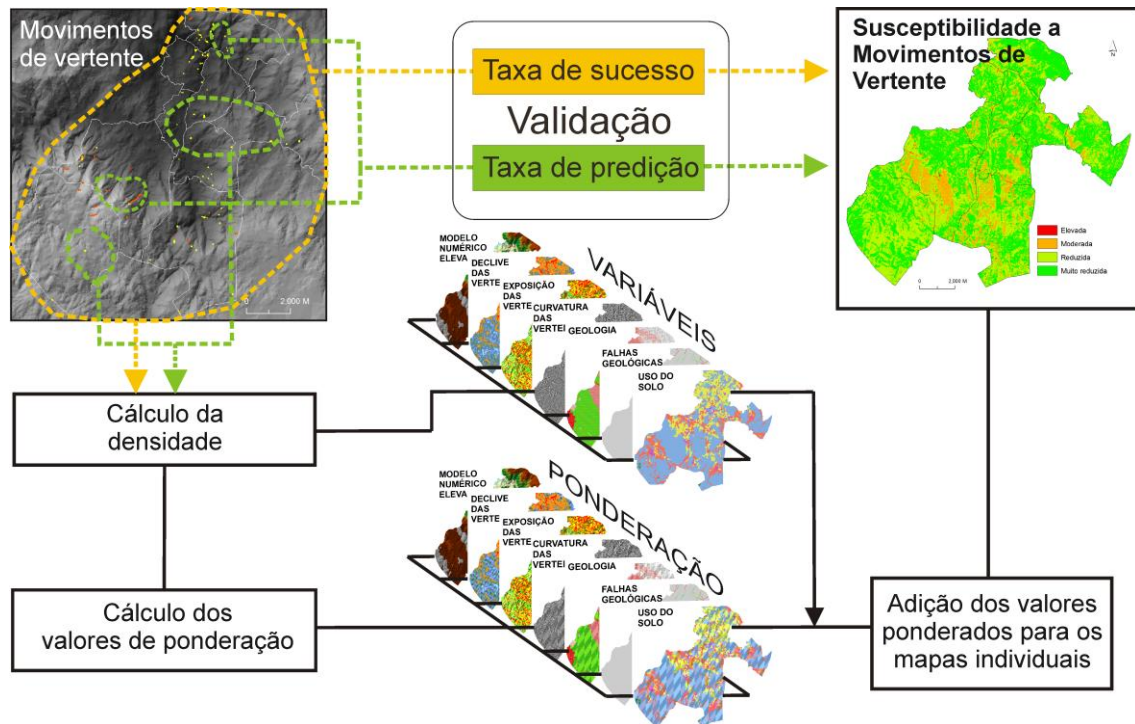


Figura 3.8. Modelo de avaliação da susceptibilidade a movimentos de vertente, com validação por taxas de sucesso e predição.

Para a quantificação das diferenças entre os vários modelos de susceptibilidade calculou-se a Área Abaixo da Curva (AAC) (VAN DEN EECKHAUT *et al.*, 2009), aferindo-se o desempenho de cada um, numa escala que varia entre 0 (performance mínima) e 1 (performance máxima). O valor encontrado de AAC obteve-se conforme o exemplo expresso no Quadro 3.1.

Quadro 3.1. Determinação da Área Abaixo da Curva para determinado tipo de movimento de vertente com base no VI.

VI (ordenado do maior para o menor)	Área (m <sup>2</sup> )	Área instabilizada (m <sup>2</sup> )	Curvas de sucesso		Determinação de AAC		
			Área do VI acumulada	Área instabilizada acumulada	...	...	AAC
			0	0			
I3	A1	B1	A1/E =G1	B1/F =H1	G1 - 0 =K1	(H1+0)/2 =Y1	Y1*K1=Z1
I2	A2	B2	(A1+A2)/E =G2	(B1+B2)/F =H2	G2 - G1 =K2	(H2+H1)/2 =Y2	Y2*K2=Z2
I1	A3	B3	(A1+A2+A3)/E =G3	(B1+B2+B3)/F =H3	G3 - G2 =K3	(H3+H2)/2 =Y3	Y3*K3=Z3
	$\Sigma(A1;A3)=E$	$\Sigma(B1;B3)=F$					$\Sigma(Z1;Z3)$

### 3. 3. AVALIAÇÃO DA IMPORTÂNCIA DE CADA FACTOR DE PREDISPOSIÇÃO NA MODELAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE

As probabilidades condicionadas dão a indicação objectiva e quantificada da importância relativa de cada variável na distribuição dos movimentos. Esta indicação é distribuída pelas várias classes que compõem a variável e permite perceber qual destas tem maior relação com a ocorrência de determinado tipo de movimentos de vertente. No entanto, este método apresenta-se limitado, ou seja, não permite aferir qual o tema mais importante do conjunto dos factores de predisposição para a ocorrência de um tipo específico de movimento de vertente.

Para a estimativa do peso de cada variável no desencadeamento de determinado movimento de vertente, pode recorrer-se aos índices *accountability* e *reliability* (A e R, respectivamente) apresentados por BLAHUT *et al.* (2010). O índice *accountability* explica como várias classes dos factores de predisposição são relevantes na análise por conterem movimentos de vertente (classes com densidades superiores à média da área de estudo); já o índice *reliability* dá ideia da densidade média de movimentos nas classes mais relevantes para a sua ocorrência (BLAHUT *et al.*, 2010). Estes índices determinam-se através das seguintes expressões:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n \kappa}{N} * 100 \quad [3.9]$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n \kappa}{\sum_{i=1}^n y} * 100 \quad [3.10]$$

Sendo:

A o índice *accountability*;

R o índice *reliability*;

$\kappa$  a área dos movimentos nas classes com valores de probabilidades condicionadas superiores à probabilidade *a priori*;

N a área total dos movimentos de vertente;

y a área de cada classe da variável independente com probabilidades condicionadas superiores à probabilidade *a priori*.

Para a utilização destes índices utilizaram-se as probabilidades condicionadas e *a priori* calculadas pelo método explicado anteriormente. As classes dos factores de predisposição consideradas para esta análise são as que têm valores de probabilidades condicionadas superiores aos valores das probabilidades *a priori*.

### 3. 4. DETERMINAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DO RISCO A MOVIMENTOS DE VERTENTE

Dada a falta de dados referentes aos elementos expostos, designadamente o seu valor nas suas diferentes acepções e o grau de perda de cada um, caso sejam afectados por um movimentos de vertente de um tipo determinado, foi apenas possível obter a localização do risco. A componente valor que integra a avaliação do risco não é fácil de calcular, visto haver enorme dificuldade na atribuição de um valor exacto ao elemento afectado, principalmente, valores monetários à perda de vidas humanas, algo considerado por alguns autores (e.g. KUWATA e TAKADA, 2004) impossível de calcular.

Assim, para a localização do risco, consideraram-se os elementos expostos e a susceptibilidade aos movimentos de vertente (Fig. 3.9). Pela importância do tempo de reacção dos meios operacionais, considerou-se o factor distância/tempo a partir dos equipamentos operacionais de maior relevo. Este último factor, neste tipo de análise, é considerado uma agravante do risco a movimentos de vertente no território, pelos condicionalismos que acarreta.

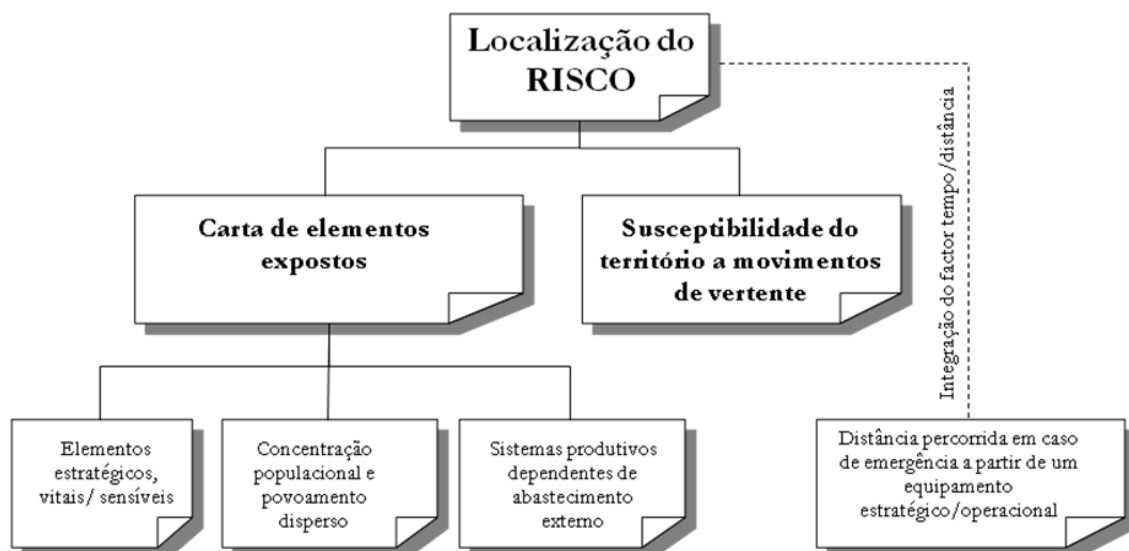


Figura 3.9. Modelo de localização do risco.

A Carta de Elementos Expostos foi elaborada com base nos elementos em risco mencionados em UNDRO (1979) e JULIÃO *et al.* (2009). Foram considerados os elementos estratégicos, vitais/sensíveis (GNR, PC, vias rodoviárias principais e escolas), os aglomerados populacionais e o povoamento disperso e, também, os principais sistemas

produtivos (fábricas com dependência de abastecimento externo). Os dados referentes aos elementos expostos considerados foram vectorizados, com base no conhecimento prévio das sua localização, à excepção da representação espacial dos aglomerados populacionais, informação obtida a partir da BGRI dos Censos de 2001 do INE. Considerou-se que cada elemento corresponde ao valor 1 (dados inseridos na tabela de atributos de cada tema), informação posteriormente convertida em *raster*, alvo de reclassificação, conforme o modelo representado no Anexo 3. Com todos os temas convertidos, fez-se o seu somatório, adquirindo cada pixel (área de 100 m<sup>2</sup>) um valor em função da quantidade de elementos presentes naquela área.

A variável distância/tempo corresponde ao tempo decorrido na deslocação pelas ruas e estradas do Município a partir do quartel dos bombeiros voluntários (BVT), considerado um equipamento estratégico para reposta à emergência (JULIÃO *et al.*, 2009). Para o cálculo desta variável utilizou-se a extensão *Network Analyst* do ArcGIS 9.3, tendo por base a velocidade média de 50km/h, por se tratar de áreas correspondentes a localidades e de topografia irregular. Esta ferramenta permitiu calcular o tempo percorrido, em função da velocidade estipulada e o atributo correspondente ao comprimento das vias. À medida que há um afastamento do equipamento seleccionado, aumenta em paralelo o tempo de deslocação.

As variáveis utilizadas na construção do mapa da localização do risco adquiriram diferentes ponderações consoante a sua importância. Para a atribuição desta ponderação, recorreu-se à ferramenta *Weight Overlay* do ArcGIS 9.3, definindo-se que as variáveis referentes à susceptibilidade e elementos expostos pesariam cada uma 45% no *output* do mapa final e a variável distância percorrida, apenas 10%. Desta operação resultou a diferenciação espacial do risco (em sentido lato) em diferentes *scores*.

### **3. 5. CONSEQUÊNCIAS OPERACIONAIS DERIVADAS DA PERDA DE INFRA-ESTRUTURAS DEVIDO A MOVIMENTOS DE VERTENTE**

A perda de infra-estruturas pela ocorrência de movimentos de vertente pode ter várias implicações, tanto ao nível económico, como social. As implicações económicas estão associadas ao custo directo da perda do elemento, ao custo da sua reconstrução e a custos indirectos, como por exemplo, a perda de uma estrada estratégica, onde todos os seus utentes são obrigados a alterar os seus percursos habituais. Estes custos reflectem-se,

sobretudo, no aumento do tempo dispendido e no consumo adicional de combustível. Já as implicações sociais consideram, para além da perda de vidas humanas, a deslocação de pessoas (desalojados), temporária ou permanente.

A perda de vias de comunicação pode ter forte impacto no condicionamento da mobilidade de pessoas e no transporte de mercadorias, adquirindo maior ênfase quando envolve actividades de socorro/emergência a pessoas afectadas numa eventual catástrofe, bem como o transporte de materiais de primeira necessidade de e para a área afectada, considerando-se que o tempo de reacção é um parâmetro fundamental (KUWATA e TAKADA, 2004; GORGE, 2006; SHEU, 2007; YUAN e WANG, 2009). Neste contexto, algumas vias rodoviárias adquirem elevada importância estratégica, sendo a sua perda um factor com implicações na actuação de todos os meios de operacionais em caso de emergência.

### **3. 5. 1. DETERMINAÇÃO DE PERCURSOS ÓPTIMOS EM FUNÇÃO DA PERDA OU INTERRUPÇÃO DE VIAS RODOVIÁRIAS**

A construção de estradas em vertentes está na origem de vários movimentos de vertente (YALCIN *et al.*, 2011). O rompimento de taludes para a construção destas infra-estruturas aumenta a instabilidade das vertentes, provocando em certos casos deslizamentos, desabamentos ou escoadas.

Considerando a importância inerente às vias rodoviárias principais, pelo papel que têm na mobilidade de pessoas e bens, determinar percursos alternativos óptimos, caso ocorra a sua interrupção, torna-se um exercício deveras complexo, principalmente na minimização de custos, tempo e distância percorrida. Esta operação assume maior importância na redução do tempo de resposta dos meios operacionais, quando há a necessidade de prestação de socorro num eventual cenário de emergência.

Os movimentos de vertente são um dos factores responsáveis pela interrupção de vias rodoviárias na área de estudo, pela sua destruição (completa ou parcial) ou simples recobrimento pelo material instabilizado. Com base nesta premissa, utilizou-se o mapa de susceptibilidade à ocorrência de movimentos de vertente do Concelho de Tarouca para a definição dos locais mais prováveis de ruptura de estradas. Posteriormente, determinou-se os percursos óptimos (distância mais curta), considerando-se estas interrupções das vias principais nos locais onde a susceptibilidade é mais elevada.



Para a determinação destes percursos, considerou-se o modelo representado na Figura 3.10.

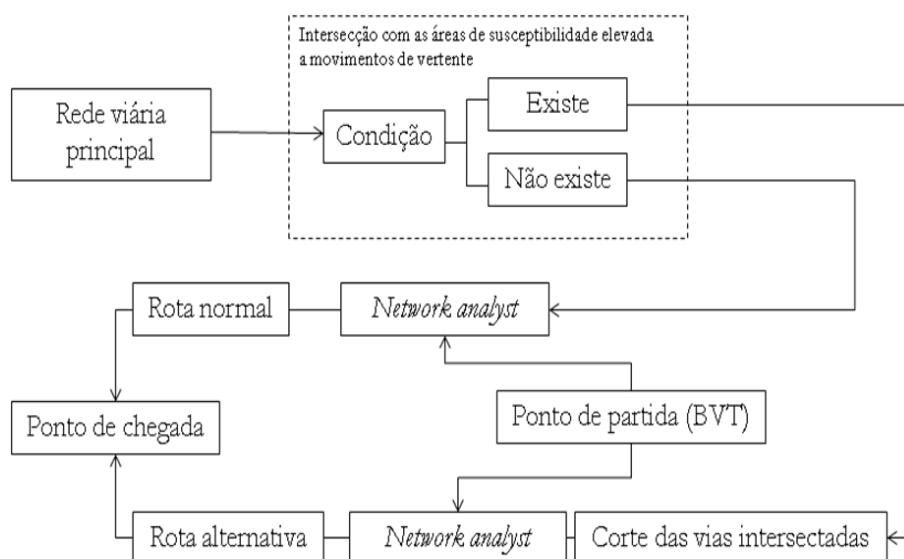


Figura 3.10. Modelo de análise de percursos óptimos.

De forma a operacionalizar o modelo representado na Figura 3.10, construiu-se uma ferramenta analítica no Model Builder do ArcGIS 9.3 (Anexo 4). Na execução desta ferramenta, o modelo corre sob determinada pré-condição, neste caso, extracção de itinerários, em função da intersecção, ou não, entre a rede viária e as áreas mais susceptíveis a movimentos de vertente.

No Concelho de Tarouca, os meios de reacção a uma eventual catástrofe ou acidentes graves são os BVT, GNR e Protecção Civil de Tarouca. Na demonstração da aplicação do modelo representado na Figura 3.10, tendo por base a informação resultante dos mapas de susceptibilidade e de risco, considerou-se uma rota de emergência com início nos equipamentos dos meios de reacção e destino a uma área considerada de risco elevado. Para tal, seleccionaram-se as áreas mais susceptíveis à ocorrência de movimentos de vertente e criou-se uma nova *feature* apenas com esta informação, servindo esta para posterior intersecção com a rede viária principal do Concelho. Se existir intersecção entre estes dois temas, toda a informação intersectada é eliminada através da ferramenta *Erase* do ArcGIS 9.3, caso contrário, o modelo gera o percurso entre os dois pontos com base na distância mais curta.

Com a extensão Network Analyst do ArcGIS 9.3 criou-se uma rede de dados vectoriais (linhas), tendo por base a rede viária principal intersectada, dados que permitiram, posteriormente, obter os respectivos percursos óptimos no ArcMAP.

## CAPÍTULO 4 - SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE

### 4.1. MOVIMENTOS DE VERTENTE VALIDADOS E A SUA DISTRIBUIÇÃO NO TERRITÓRIO

Na inventariação dos diferentes movimentos de vertente, a partir de técnicas distintas foi sempre considerada a totalidade da área afectada.

O Quadro 4.1 sintetiza os resultados da inventariação efectuada para o território de Tarouca, com recurso a quatro técnicas de inventariação. Foram identificados 128 movimentos validados, correspondendo estes a 50 002,4m<sup>2</sup> de área instabilizada (0,045% da área do Município). Embora seja de carácter obrigatório a validação no terreno de todos os movimentos inventariados por fotointerpretação, é fundamental proceder ao reconhecimento de campo de sinais adicionais de instabilidade geomorfológica, visto existirem vários movimentos de vertentes que não são identificáveis no gabinete. Este facto comprova-se no presente trabalho, pela grande quantidade de movimentos identificados apenas por trabalho de campo (62% do total).

Quadro 4.1. Movimentos de vertente identificados no Concelho de Tarouca com as diferentes técnicas de inventariação.

Bases da identificação	Tipologia dos movimentos de vertente					Área instabilizada (m²)	% da área total	
	Deslizamentos				Escoadas			Desabamentos
	Rotac.	Volume (m3)	Transl.	Volume (m3)				
Ortofotomapas	2	52,3	18	18350	26	0	32525,7	0,03250
Google Earth	0	0	1	671,1	0	0	613,4	0,00061
Curvas de nível	0	0	2	71,1	0	0	69,2	0,00007
Trabalho de campo	8	5090,7	68	8879,7	2	1	16794,1	0,01678
TOTAL	10	5143	89	27971,9	28	1	50002,4	0,04996

Nas freguesias da parte N do concelho (Gouviães e Salzedas) registaram-se mais movimentos de vertente, face à restante área de estudo (Fig. 4.1). São, maioritariamente, deslizamentos e ocorrem, sobretudo, em terrenos agrícolas. Estas áreas apresentam forte declive e, para maior aproveitamento agrícola, a superfície das vertentes foi alvo de forte intervenção antrópica através da construção de socacos. Estes são aproveitados para o

cultivo de olival e vinha e estão estabilizados por muros construídos com blocos e cascalho provenientes das rochas existentes no local. É nestes muros que se verifica o rompimento do talude, pelas mais diversas razões (actividades agrícolas ou abandono, crescimento do sistema radicular da vegetação arbórea, erosão hídrica, entre outros), deixando estas estruturas parcialmente destruídas. Para a construção dos muros dos terrenos agrícolas na proximidade do Rio Varosa, foram utilizados blocos de granito que aqui existem em grande abundância. Estes blocos, morfologicamente, apresentam alguma esfericidade, facto que favorece a instabilidade destas estruturas e proporciona a deslocação, por rolamento, deste material para áreas mais distantes.

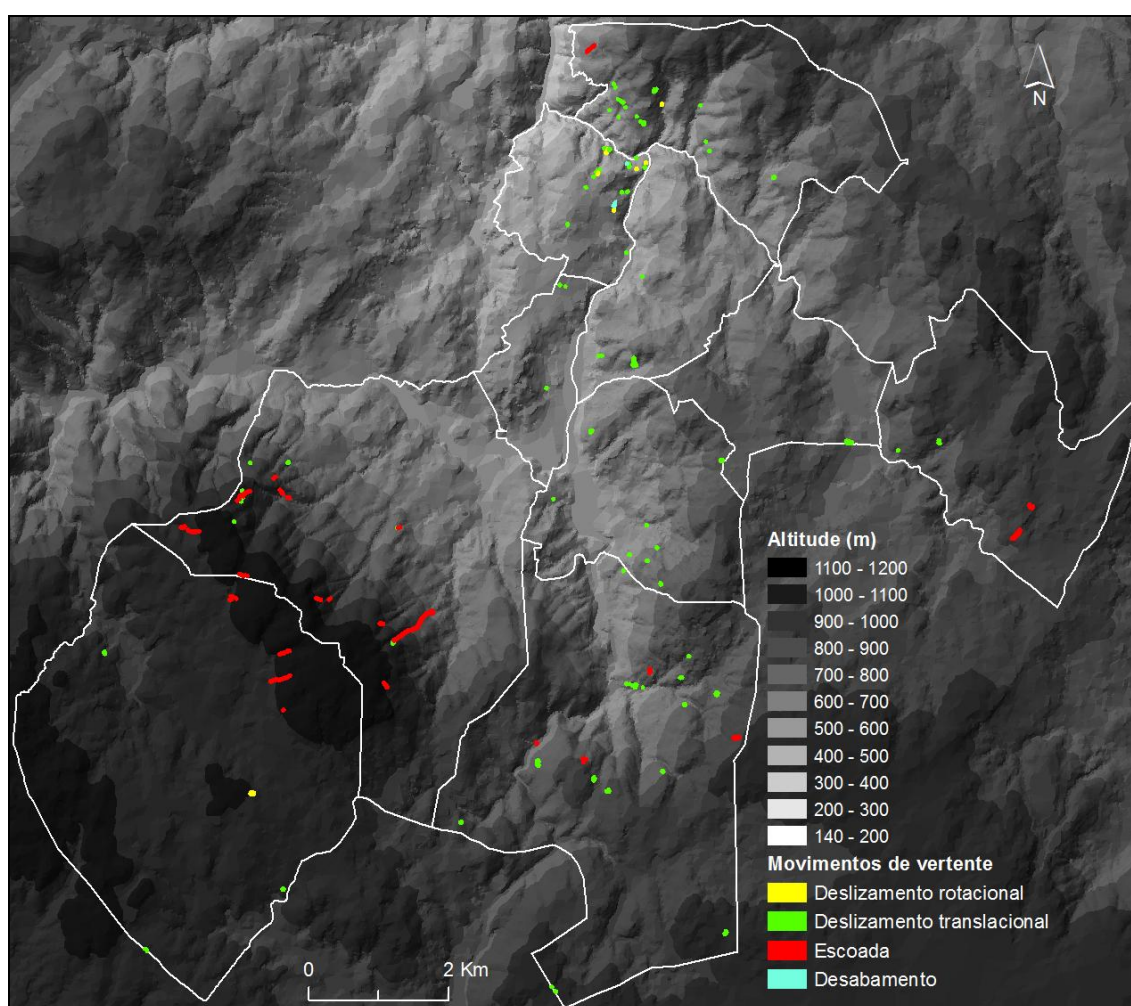


Figura 4.1. Movimentos de vertente validados no Concelho de Tarouca.

O desabamento identificado no vale encaixado entre Gouviães e Vila Pouca (Salzedas) ocorreu no afloramento rochoso presente na vertente esquerda, verificando-se no fundo do vale, a presença de dois grandes blocos graníticos provenientes deste movimento.

Na Serra de Santa Helena, os movimentos mais frequentes são pequenas escoadas. Estas ocorrem, principalmente, nos depósitos de vertente superficiais e prolongam-se para áreas mais deprimidas, geralmente, linhas de água, o que proporciona o transporte do material afectado para áreas mais distantes.

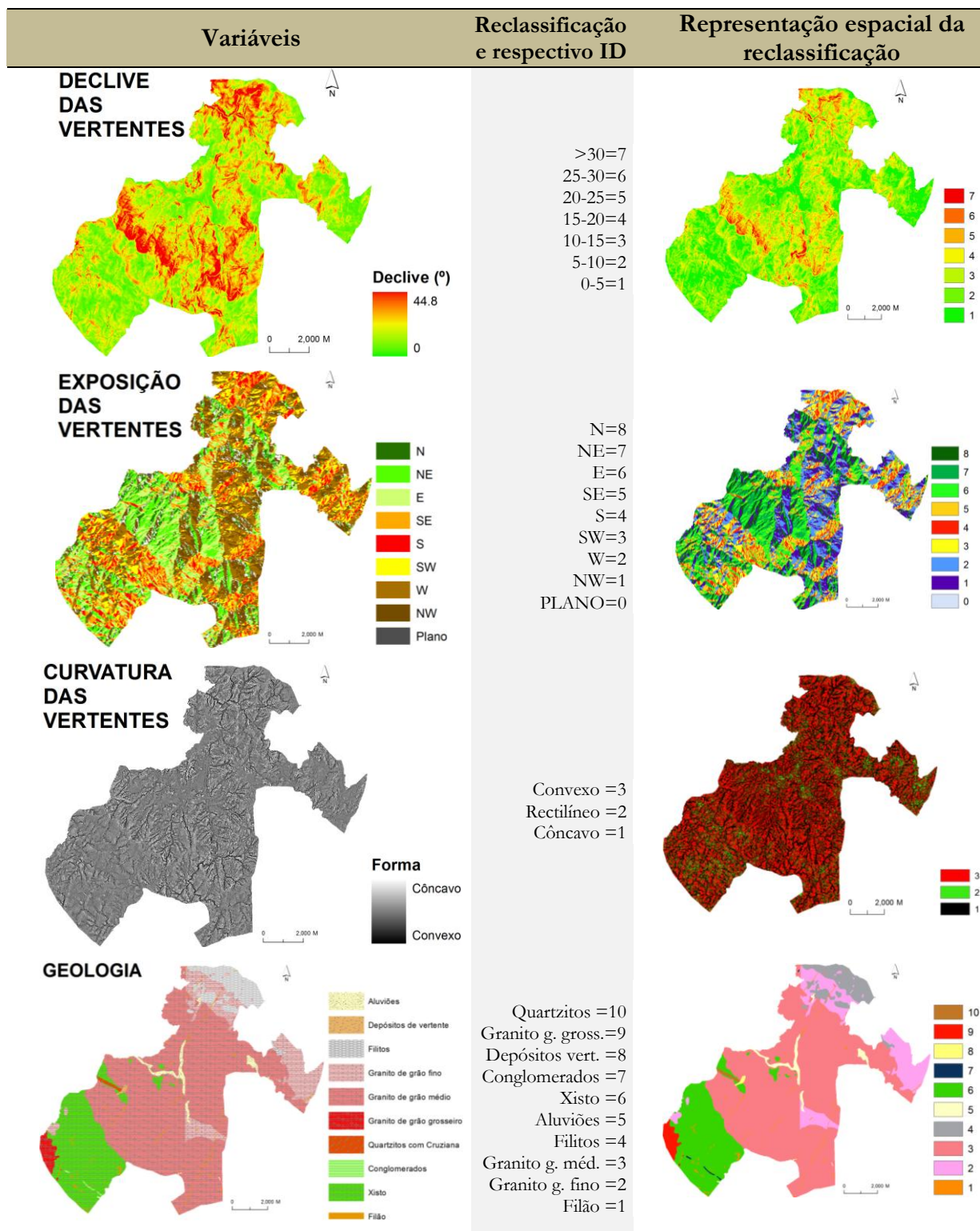
Nas áreas com elevada altitude (Várzea da Serra) presumia-se a existência de bastantes movimentos, pela observação dos ortofotomapas, no entanto, quando se procedeu à validação no terreno dos presumíveis movimentos assinalados, verificou-se que estes correspondem a intervenções antrópicas, como por exemplo, minas de captação de água e escavações para construção. Os poucos deslizamentos encontrados nos cabeços arredondados destas áreas xistentas ocorreram devido a intervenções nos taludes para a construção de caminhos ou estradas. Na Freguesia de Vila Chã da Beira verificou-se a ocorrência de algumas escoadas numa área onde ocorreu recentemente um incêndio.

#### **4. 2. VARIÁVEIS UTILIZADAS NA MODELAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE**

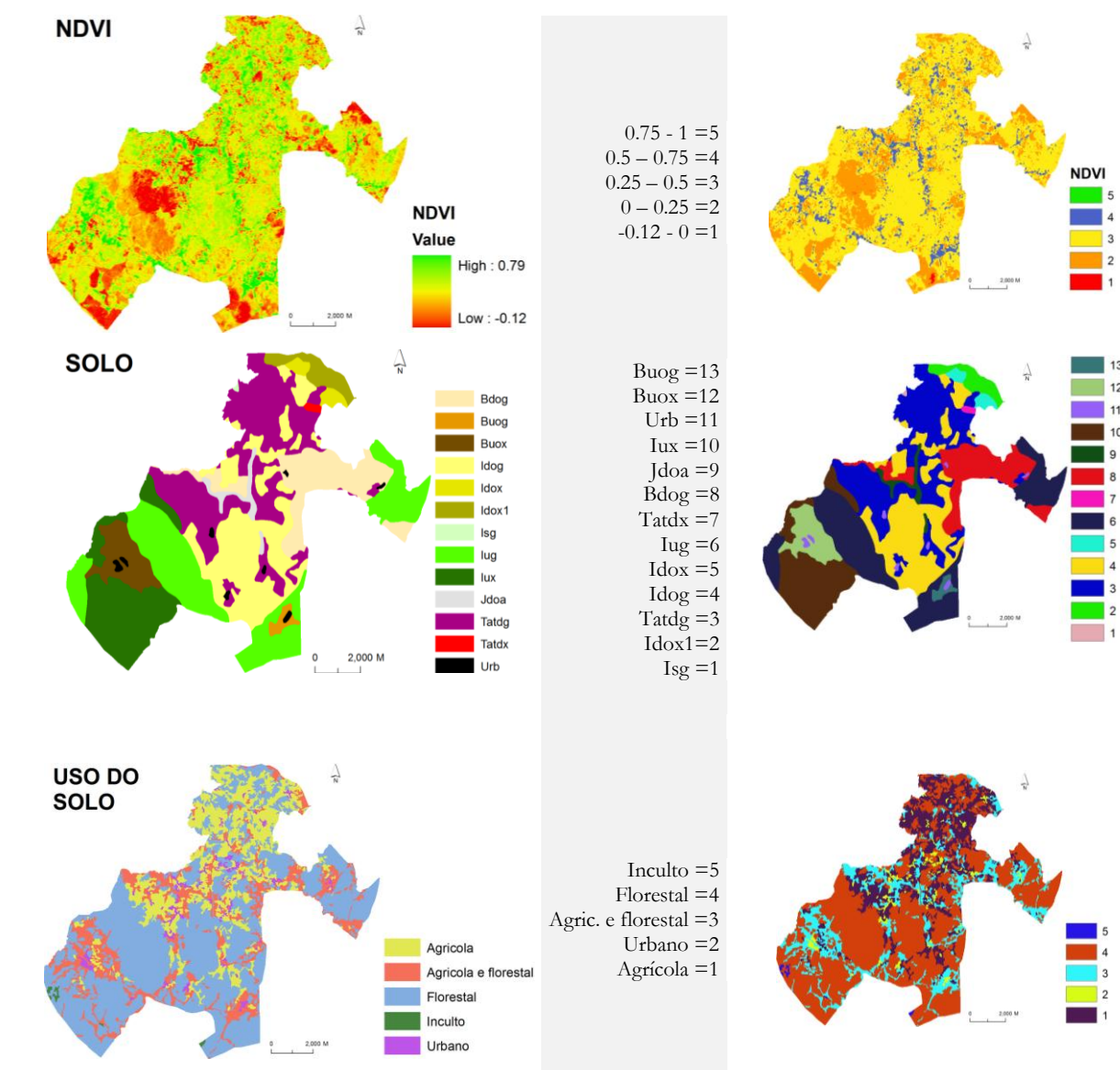
As variáveis consideradas inserem-se no conjunto dos factores de predisposição, ou seja, dos factores que têm influência no condicionamento do grau de instabilidade potencial das vertentes. Estas foram convertidas do formato vectorial para *raster* e posterior reclassificação, de forma a poderem integrar o modelo de determinação da susceptibilidade. No processo de reclassificação das diversas variáveis, foi atribuído um valor aleatório (ID) a cada pixel, identificando-se uma classe ou elemento, pelo conjunto de pixéis com os mesmos valores. Definiu-se que todos os *outputs* resultantes das várias operações deveriam ter pixéis com a resolução de 10x10, ou seja, 100m<sup>2</sup> (Fig. 4.2).

A partir do MNE derivaram algumas variáveis (declive, exposição e curvaturas das vertentes) para complementar o conjunto de variáveis que reflectem algumas características físicas essenciais do território (geologia, solo, uso do solo e ocupação do solo, sendo esta última variável obtida pelo cálculo do NDVI). Estes dados são fundamentais para a avaliação da susceptibilidade do território a movimentos de vertente.

Figura 4.2. Representação espacial das variáveis utilizadas na avaliação da susceptibilidade aos movimentos de vertente e respectiva representação da reclassificação em *raster*.







Observando o mapa de declives (Fig. 4.2), verifica-se que as vertentes da Serra de Santa Helena, em conjunto com as vertentes do vale encaixado na parte N da área de estudo, destacam-se com a inclinação mais acentuada. A Freguesia de Várzea da Serra, inserida na designada superfície fundamental, apresenta maioritariamente declives mais reduzidos, face às áreas mencionadas anteriormente, com excepção de alguns cabeços com maior declive, correspondentes a áreas xistentas bastante dissecadas, encontrando-se algumas destas formas de relevo, modificadas topograficamente por intervenção antrópica. Os fundos dos vales mais amplos apresentam um declive fraco ou nulo. Na reclassificação considerou-se classes de 5° de inclinação até aos 30° e agruparam-se os declives mais elevados (>30°) numa única classe, correspondendo esta apenas a 722 400m<sup>2</sup> (0,72% da área de estudo). Com a excepção da classe de declive mais baixa, pode dizer-se que quanto maior o declive

das vertentes, menor a área abrangida (Fig. 4.3), destacando-se a classe dos 5° a 10°, com cerca de 32% da área total.

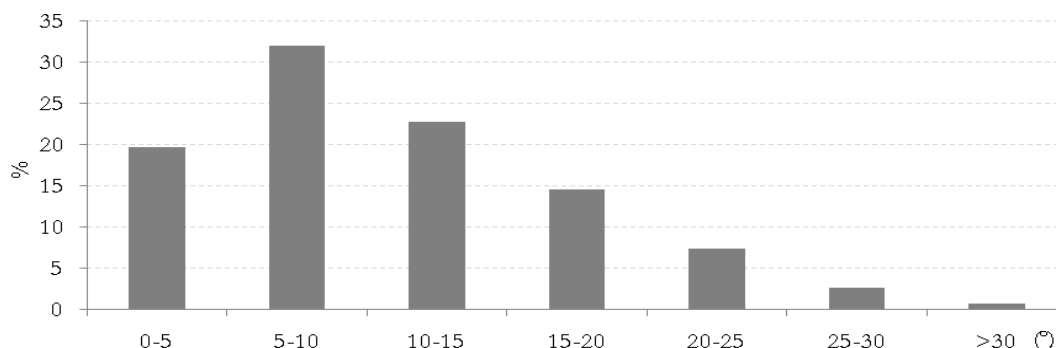


Figura 4.3. Percentagem da área de estudo por classe de declive.

A exposição das vertentes está repartida por octantes. As vertentes voltadas a W são as que têm maior representatividade (17,08% da área de estudo), seguindo-se as vertentes voltadas a NW, E, NE, SW, N, SE e S (14,73; 13,66; 13,66; 12,78; 12,07; 10,30; 9,87 e 9,51% de área, respectivamente). As áreas planas, devido à sua dimensão muito reduzida, não têm representação espacial após a reclassificação. Nesta variável são visíveis vários alinhamentos, coincidentes com os limites geológicos, muitos deles a denunciar o sistemas de falhas existente.

A variável “Curvatura das vertentes” foi classificada em três classes quanto à forma, distinguindo-se as vertentes com curvatura côncava ( $<-0,05$ ), rectilínea ( $-0,05 - 0,05$ ) e convexa ( $>0,05$ ). As vertentes côncavas representam 45,51% da área de estudo, as convexas 41,93% e as rectilíneas 12,99%. O primeiro tipo de vertentes correspondente, maioritariamente, ao sector montante das vertentes, o segundo ao sector jusante e as vertentes rectilíneas, a áreas com fraco declive, destacando-se nestas últimas, áreas de fundo do Vale do Varosa e algumas áreas deprimidas da área existente (Várzea da Serra).

Quanto à variável “Geologia”, esta foi obtida a partir da vectorização das Cartas Geológicas 14-A e 14-B da Carta Geológica de Portugal. Devido à generalização ou pouco rigor na elaboração destas cartas e, também, ao desfazamento entre as datas da sua realização, a Folha 14-A apresenta-se mais simplificada face à 14-B. Assim, optou-se pelo agrupamento da geologia pelo tipo de rocha (ver Fig. 4.2). Neste agrupamento, pressupõe-se que os movimentos de vertente se desenrolem da mesma forma, em contexto litológico análogo, tendo como base os mesmos factores de predisposição e condições



desencadeantes. Os granitos de grão médio representam 61,48% da área considerada, seguindo-se os xistos (17,66%), os granitos de grão fino (11,03%) e, com menor expressão (9,83%), as restantes litologias (filitos, aluviões, granito de grão grosseiro, filões, quartzitos, depósitos de vertente e conglomerados).

A vegetação existente na superfície das vertentes tem influência na regulação de água que circula nas mesmas. Esta permite a sua retenção e, paralelamente, proporciona a sua infiltração, facto que contribui para a elevação do volume de água existente no solo e subsolo, podendo conduzir, desta forma, à instabilidade da vertente. O processo de infiltração está dependente dos factores intrínsecos (e.g. solo, litologia, fracturação) e extrínsecos (e.g. precipitação, insolação, temperatura, uso do solo). Por outro lado, a ausência de vegetação proporciona maior erosão, processo que pode levar ao desencadeamento de movimentos de vertente, principalmente quando os taludes perdem sustentação pela erosão que ocorre na sua base (REBELO, 1977). Considerando-se a importância desta variável, determinou-se a cobertura vegetal através de técnicas de Detecção Remota (DR), calculando-se o índice de biomassa presente no período de maior desenvolvimento vegetativo. O indicador utilizado foi o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), determinado a partir das bandas espectrais 3 e 4 das imagens de satélite Landsat 5<sup>TM</sup> de 25 de Maio de 2010 (resolução de 30x30m). Este índice é traduzido numericamente num intervalo compreendido entre 1 (máximo de vegetação) e -1 (ausência de vegetação ou vegetação seca). Nos resultados obtidos neste cálculo, individualizam-se grandes manchas com índice muito reduzido, ou seja, ausência de vegetação. Nas várias campanhas de trabalho de campo verificou-se que estas correspondem a áreas onde deflagraram incêndios ou com intervenção antrópica (desflorestação), sendo visível em algumas delas, pequenos movimentos de vertente, nomeadamente pequenas escoadas ocorridas recentemente. É nas áreas mais deprimidas que se registam os valores mais elevados deste índice, principalmente nas áreas mais próximas aos cursos de água. Da reclassificação dos dados resultantes deste índice derivaram 5 classes com amplitude de 0.25, havendo somente uma classe com valores inferiores a 0.

A variável “Solo” resultou da adaptação da Folha 14 da Carta dos Solos do Nordeste Transmontano (1:100 000) disponibilizada pelo Sistema Nacional de Informação Geográfica (SNIG). Esta carta está classificada por Unidades Cartográficas (e.g. Tatdg-1.1), subdividindo-se estas por grupo (Tatdg) e subgrupo (1.1). Para reclassificação desta variável consideraram-se apenas os códigos dos grupos, dos quais resultaram treze classes, expressas no Quadro 4.2. Estas classes representam diferentes tipos de solo, divididas em

função dos seus constituintes (aparência e propriedades). O solo de cada unidade pedológica formou-se a partir do mesmo material original, sob condições climáticas semelhantes, vegetação, topografia e tempo.

Quadro 4.2. Solos e respectiva área abrangida por unidade pedológica no Concelho de Tarouca.

Unidades Pedológicas	Características	Código do grupo	% da área total
Antrossolos áricos terrácicos	(em áreas de granitos e rochas afins)	Tatdg	23,06
dístricos	(em áreas de xistos e rochas afins)	Tatdx	
Cambissolos dístricos órticos	(em áreas de granitos e rochas afins)	Bdog	11,15
Cambissolos úmbricos órticos	(em áreas de granitos e rochas afins)	Buog	5,60
	(em áreas de xistos e rochas afins)	Buox	
Fluvisolos dístricos órticos	(em áreas de aluviões)	Jdoa	1,48
Leptossolos dístricos órticos	(em áreas de granitos e rochas afins)	Idog	23,29
	(em áreas de xistos e rochas afins)	Idox	
	(em áreas de xistos e rochas afins 1)	Idox1	
Leptossolos líticos	(em áreas de granitos e rochas afins)	Isg	0,06
Leptossolos úmbricos	(em áreas de granitos e rochas afins)	Iug	34,66
	(em áreas de xistos e rochas afins)	Iux	
Urbano	Urbano	Urb	0,69

A ocupação do solo e algumas actividades antrópicas nele desenvolvidas têm influência na estabilidade de vertentes (BATEIRA, 2001; BRUNETTI *et al.*, 2009; PEREIRA, 2009). A remoção do suporte basal das vertentes (e.g. construção de estradas e habitações), obstrução da rede de drenagem, alteração ou remoção da vegetação, entre outros factores, pode estar na origem de movimentos de vertente. Partindo destes pressupostos, avaliou-se a ocupação do solo e as actividades que nele se praticam, como factores que podem promover ou desencadear movimentos de vertente. Para a determinação da variável “Uso do solo” recorreu-se à COS’90 disponibilizada pelo Instituto Geográfico Português (IGP). Esta foi classificada em cinco classes, em função das várias ocupações do solo e do seu uso (agrícola, agrícola e florestal, florestal, inculto e urbano). A classe mais representativa no Concelho de Tarouca é a florestal (48,4% da área total). Com menor dimensão encontra-se a ocupação agrícola e florestal (25,8%), a agrícola (20,8%), urbana (4,9%) e as áreas de inculto (0,1%). Nas áreas florestais há predominância de pinheiros bravos (*Pinus pinaster*) e matos arbustivos (*Cytisus scoparius*, *Ulex densus*, ...), embora haja, também, a presença de outras espécies arbóreas com relevância, como o pinheiro manso (*Pinus pinea*), castanheiro manso e bravo (*Castanea sativa*), eucalipto (*Eucalyptus*) e carvalho (*Quercus spp.*). Quanto à ocupação agrícola, esta é diferenciada nas partes N e S do Município. Em grande parte das áreas agrícolas nas vertentes da Freguesia de Salzedas, a ocupação predominante é o olival.

Este também predomina nas vertentes das Freguesias de Gouviães e Ucanha, embora com menor expressão face à freguesia anterior, destacando-se ainda a ocupação por vinha e outras espécies arbustivas. Já os pomares de macieiras e sabugueiros estão plantados no vale do Varosa (Dalvares e Tarouca), estando a sua planície aluvial aproveitada para culturas de regadio (milho e outras herbáceas), devido à abundância de água. As áreas agrícolas de maior altitude localizadas na parte S do concelho são aproveitadas para a cultura de cereais, estando a restante área ocupada, predominantemente, por arbustos. Em toda a área de estudo, a ocupação mista (agrícola e florestal) é significativa, composta por pequenas parcelas com diferentes culturas (geralmente, culturas de subsistência), havendo em paralelo, a ocupação por espécies florestais naturais. Estas podem estar na mesma área cultivada ou na sua proximidade, daí o agrupamento destas duas tipologias, do qual resulta a denominada ocupação mista do solo.

#### **4. 3. AVALIAÇÃO E VALIDAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE COM DIFERENTES MÉTODOS ESTATÍSTICOS**

##### **4. 3. 1. PROBABILIDADES CONDICIONADAS**

Para a utilização do Método do Valor Informativo (VI) proposto por YIN e YAN (1988), determinaram-se, para cada tipo de movimento as probabilidades *a priori* (Quadro 4.3) e as respectivas probabilidades condicionadas para cada classe das diversas variáveis independentes que integraram a modelação (Quadro 4.4).

Considerando as probabilidades condicionadas da variável “Declive”, tendo em conta os valores apresentados no Quadro 4.4, verifica-se que a classe de ID 1 (0-5°) é a que apresenta maior importância relativa na distribuição dos deslizamentos rotacionais; enquanto nos deslizamentos translacionais é a classe ID 5 (20-25°) e nas escoadas a classe ID 7, ou seja, os declives mais elevados (>35°).

Quanto à exposição das vertentes, as probabilidades condicionadas fazem destacar as vertentes expostas a NW nos deslizamentos rotacionais, as vertentes expostas a SE para os translacionais e as vertentes voltadas a SW para as escoadas.

Relativamente à curvatura das vertentes, as áreas côncavas e convexas têm maior importância na distribuição dos deslizamentos rotacionais, enquanto nos translacionais e nas escoadas, destaca-se apenas o primeiro tipo de vertentes na sua distribuição.

Já na variável “Geologia”, as áreas compostas por aluviões são as que apresentam maior importância na distribuição dos deslizamentos rotacionais, devido à instabilização de socos antrópicos presentes nestes materiais, associada à sua reduzida representação espacial. As áreas de granitos de grão médio e áreas com presença de filões são as que mais se associam à distribuição dos deslizamentos translacionais. As áreas compostas por quartzitos apresentam a maior relação com a distribuição das escoadas.

A vegetação tem influência na distribuição dos movimentos de vertente. Esta constatação verificou-se no campo e é corroborada pelos valores das probabilidades condicionadas da variável NDVI, observando-se que as áreas com índice de biomassa mais reduzido apresentam elevada associação com a distribuição dos movimentos de vertente. Os valores deste índice obtidos para a área de estudo variam entre -0,12 e 0,79 e, admitindo a sua variação numa escala compreendida entre -1 (ausência de vegetação ou vegetação seca e bastante degradada) e 1 (índice máximo de clorofila), pode observar-se que a classe ID 2 (0 – 0,25) apresenta forte probabilidade à ocorrência de deslizamentos rotacionais e escoadas, enquanto para os deslizamentos translacionais destaca-se a classe ID 3 (0,25 – 0,5).

No uso e ocupação do solo evidenciam-se as áreas florestais como as mais importantes na distribuição de todos os tipos de movimentos de vertente. Esta contradição com os resultados obtidos para a variável anterior demonstra a importância da cartografia actualizada, visto esta variável ser elaborada com base na COS'90, informação descontextualizada com a ocupação actual do território. Como foi mencionado anteriormente, estas manchas florestais estão bastante degradadas (incêndios e desflorestação), facto que se manifesta relevante no incremento da instabilidade geomorfológica, daí a presença de muitos movimentos de vertente nesta classe (81% da área total instabilizada).

Quanto aos tipos de solos que compõem a área de estudo, os Leptossolos úmbricos em áreas de xistos e rochas afins têm maior importância na distribuição dos movimentos rotacionais, enquanto nos Cambissolos úmbricos órticos em áreas de granitos e rochas afins destacam-se os deslizamentos translacionais. As escoadas associam-se essencialmente aos Leptossolos úmbricos em áreas de granitos e rochas afins.

Quadro 4.3. Probabilidades *a priori* nos três tipos de movimentos de vertente.

Tipo de movimento	Área total instabilizada (m2)	Probabilidade <i>a priori</i> ( <i>Pp</i> )
Deslizamentos rotacionais	2200	0,0000220
Deslizamentos translacionais	18300	0,0001829
Escoadas	26200	0,0002618

Quadro 4.4. Probabilidades condicionadas obtidas para as classes dos factores de predisposição nos três tipos de movimentos de vertente considerados na modelação da susceptibilidade.

Variáveis	ID	Área de cada classe (m2)	Área do movimento (m2)			Probabilidade condicionada* ( <i>PC<sub>ji</sub></i> )		
			Desl. Rotac.	Desl. Transl.	Escoadas	Desl. Rotac.	Desl. Transl.	Escoadas
Declive	1	19785000	1300	3800	1300	<b>0,000066</b>	0,000192	0,000066
	2	32024100	200	1500	6500	0,000006	0,000047	0,000203
	3	22884900	100	3000	6300	0,000004	0,000131	0,000275
	4	14632500	400	4600	7500	0,000027	0,000314	0,000513
	5	7387300	200	3900	2800	0,000027	<b>0,000528</b>	0,000379
	6	2630600	0	1200	700	0,000000	0,000456	0,000266
	7	722400	0	300	1100	0,000000	0,000415	<b>0,001523</b>
Exposição	0	103	0	0	0	0,000000	0,000000	0,000000
	1	10310600	800	1100	900	<b>0,000078</b>	0,000107	0,000087
	2	12789200	700	3900	5100	0,000055	0,000305	0,000399
	3	13667900	300	1800	7200	0,000022	0,000132	<b>0,000527</b>
	4	9874200	200	1100	700	0,000020	0,000111	0,000071
	5	9514300	0	4400	3200	0,000000	<b>0,000462</b>	0,000336
	6	12074600	0	1400	3500	0,000000	0,000116	0,000290
	7	17093700	0	2200	5400	0,000000	0,000129	0,000316
Curvatura	8	14742200	200	2400	200	0,000014	0,000163	0,000014
	1	41521200	1000	9800	17200	<b>0,000024</b>	<b>0,000236</b>	<b>0,000414</b>
	2	13003200	100	2000	2200	0,000008	0,000154	0,000169
Geologia	3	45542400	1100	6500	6800	<b>0,000024</b>	0,000143	0,000149
	1	856700	0	200	100	0,000000	<b>0,000233</b>	0,000117
	2	11038600	0	2400	2500	0,000000	0,000217	0,000226
	3	61522300	500	14300	22300	0,000008	0,000232	0,000362
	4	5455600	200	500	0	0,000037	0,000092	0,000000
	5	1605100	200	100	0	<b>0,000125</b>	0,000062	0,000000
	6	17677700	1300	800	600	0,000074	0,000045	0,000034
	7	110000	0	0	0	0,000000	0,000000	0,000000
	8	137200	0	0	0	0,000000	0,000000	0,000000
	9	1401300	0	0	0	0,000000	0,000000	0,000000
NDVI	10	268300	0	0	700	0,000000	0,000000	<b>0,002609</b>
	1	169500	0	0	0	0,000000	0,000000	0,000000
	2	22965800	8200	3800	1500	<b>0,000357</b>	0,000165	<b>0,000065</b>
	3	68485100	17900	14300	700	0,000261	<b>0,000209</b>	0,000010
Uso do solo	4	8460000	100	200	0	0,000012	0,000024	0,000000
	1	20693500	200	3600	700	0,000010	0,000174	0,000034
	2	2587800	0	100	0	0,000000	0,000039	0,000000
	3	17749100	300	1100	2700	0,000017	0,000062	0,000152
	4	58773100	1700	13500	22800	<b>0,000029</b>	<b>0,000230</b>	<b>0,000388</b>
Solo	5	276900	0	0	0	0,000000	0,000000	0,000000
	1	62500	0	0	0	0,000000	0,000000	0,000000
	2	2711100	0	0	0	0,000000	0,000000	0,000000
	3	22830400	900	7000	4000	0,000039	0,000307	0,000175
	4	19350700	0	5400	6100	0,000000	0,000279	0,000315
	5	1247000	0	0	0	0,000000	0,000000	0,000000
	6	21436700	0	2500	13200	0,000000	0,000117	<b>0,000616</b>
	7	251400	0	0	0	0,000000	0,000000	0,000000
	8	11159200	0	2500	0	0,000000	0,000224	0,000000
	9	1483500	0	0	0	0,000000	0,000000	0,000000
	10	13248300	1300	0	2200	<b>0,000098</b>	0,000000	0,000166
	11	689800	0	0	0	0,000000	0,000000	0,000000
	12	4866800	0	0	700	0,000000	0,000000	0,000144
	13	742800	0	900	0	0,000000	<b>0,001212</b>	0,000000
Valor Máximo						0,000357	0,001212	0,002609

\* Os valores a negrito destacam os factores mais condicionantes na distribuição da instabilidade.

#### 4.3.2. VALOR INFORMATIVO

Com os resultados das probabilidades *a priori* e condicionadas, calculou-se o VI para cada classe das variáveis utilizadas na modelação da susceptibilidade (valores sintetizados no Quadro 4.5).

Os VI negativos mais elevados traduzem a fraca probabilidade do território à ocorrência de movimentos, enquanto os VI mais elevados representam a probabilidade mais elevada à ocorrência de instabilidade. Nas classes onde não há registo de movimentos, o VI não é determinável devido à normalização logarítmica (impossibilidade de obter o logaritmo natural do valor 0, resultante da divisão da probabilidade condicionada pela probabilidade *a priori*). Nestes casos, considerou-se como VI o decimal mais baixo por comparação ao VI mínimo obtido na respectiva variável (valores a negrito). A excepção a esta regra diz respeito à variável “Solo”, no caso dos deslizamentos rotacionais. Neste caso, uma vez que todas as classes que registam instabilidade têm VI positivo, foi atribuído o VI mais baixo observado na totalidade das variáveis às classes que não registam movimentos de vertente (-1,7).

Todos os VI obtidos foram inseridos manualmente nos campos criados na tabela de atributos de cada variável (um campo para cada tipo de movimento). Posteriormente, procedeu-se ao somatório de todas as variáveis pelos valores destes campos, através da ferramenta *Map Algebra* do ArcGIS 9.3., resultando desta operação o respectivo mapa de susceptibilidade para cada tipo de movimento de vertente. Cada pixel deste mapa reflecte o somatório dos valores informativos presentes nas unidades matriciais de todas as variáveis independentes.

Quadro 4.5. Valores Informativos e valores “fuzificados” obtidos para as classes dos factores de predisposição nos três tipos de movimentos de vertente considerados.

Variáveis	ID	Valor Informativo (VI)			Fuzzy Membership		
		Desl. Rotac.	Desl. Transl.	Escuada	Desl. Rotac.	Desl. Transl.	Escuada
Declive	1	1,0948	0,0490	-1,3825	0,18	0,16	0,03
	2	-1,2585	-1,3621	-0,2546	0,02	0,04	0,08
	3	-1,6157	-0,3329	0,0502	0,01	0,11	0,11
	4	0,2178	0,5417	0,6717	0,08	0,26	0,20
	5	0,2082	1,0602	0,3699	0,08	0,44	0,15
	6	<b>-1,7000</b>	0,9140	0,0162	0,00	0,38	0,10
	7	<b>-1,7000</b>	0,8201	1,7606	0,00	0,34	0,58
Exposição	0	<b>-0,5000</b>	<b>-0,6000</b>	<b>-3,0000</b>	0,00	0,00	0,00
	1	1,2611	-0,5389	-1,0985	0,22	0,09	0,03
	2	0,9121	0,5113	0,4207	0,15	0,25	0,15
	3	-0,0016	-0,3283	0,6991	0,06	0,11	0,20
	4	-0,0820	-0,4957	-1,3065	0,06	0,09	0,03
	5	<b>-0,5000</b>	0,9277	0,2504	0,00	0,38	0,13
	6	<b>-0,5000</b>	-0,4557	0,1017	0,00	0,10	0,11
	7	<b>-0,5000</b>	-0,3513	0,1878	0,00	0,11	0,12
Curvatura	8	-0,4828	-0,1163	-2,9601	0,04	0,13	0,01
	1	0,0912	0,2551	0,4588	0,07	0,19	0,16
	2	-1,0504	-0,1731	-0,4367	0,02	0,13	0,06
Geologia	3	0,0940	-0,2479	-0,5616	0,07	0,12	0,06
	1	<b>-1,0000</b>	0,2442	-0,8078	0,00	0,19	0,04
	2	<b>-1,0000</b>	0,1730	-0,1450	0,00	0,18	0,09
	3	-0,9951	0,2398	0,3253	0,02	0,19	0,14
	4	0,5114	-0,6909	<b>-2,1000</b>	0,10	0,08	0,00
	5	1,7348	-1,0768	<b>-2,1000</b>	0,35	0,05	0,00
	6	1,2075	-1,3965	-2,0430	0,21	0,04	0,01
	7	<b>-1,0000</b>	<b>-1,4000</b>	<b>-2,1000</b>	0,00	0,00	0,00
	8	<b>-1,0000</b>	<b>-1,4000</b>	<b>-2,1000</b>	0,00	0,00	0,00
	9	<b>-1,0000</b>	<b>-1,4000</b>	<b>-2,1000</b>	0,00	0,00	0,00
NDVI	10	<b>-1,0000</b>	<b>-1,4000</b>	2,2991	0,00	0,00	1,00
	1	<b>-0,1000</b>	<b>-2,1000</b>	<b>-0,8000</b>	0,00	0,00	0,00
	2	0,3103	-0,0999	1,0890	1,00	0,14	0,03
	3	-0,0016	0,1327	-0,7658	0,73	0,17	0,00
Uso do solo	4	<b>-0,1000</b>	-2,0457	<b>-0,8000</b>	0,03	0,02	0,00
	1	-0,8217	-0,0498	-2,0463	0,03	0,14	0,01
	2	<b>-0,9000</b>	-1,5543	<b>-2,1000</b>	0,00	0,03	0,00
	3	-0,2628	-1,0820	-0,5429	0,05	0,05	0,06
	4	0,2745	0,2281	0,3933	0,08	0,19	0,15
Solo	5	<b>-0,9000</b>	<b>-1,6000</b>	<b>-2,1000</b>	0,00	0,00	0,00
	1	<b>-1,7000</b>	<b>-0,5000</b>	<b>-0,6000</b>	0,00	0,00	0,00
	2	<b>-1,7000</b>	<b>-0,5000</b>	<b>-0,6000</b>	0,00	0,00	0,00
	3	0,5841	0,5169	-0,4016	0,11	0,25	0,07
	4	<b>-1,7000</b>	0,4227	0,1858	0,00	0,23	0,12
	5	<b>-1,7000</b>	<b>-0,5000</b>	<b>-0,6000</b>	0,00	0,00	0,00
	6	<b>-1,7000</b>	-0,4497	0,8553	0,00	0,10	0,24
	7	<b>-1,7000</b>	<b>-0,5000</b>	<b>-0,6000</b>	0,00	0,00	0,00
	8	<b>-1,7000</b>	0,2031	<b>-0,6000</b>	0,00	0,18	0,00
	9	<b>-1,7000</b>	<b>-0,5000</b>	<b>-0,6000</b>	0,00	0,00	0,00
	10	1,4960	<b>-0,5000</b>	-0,4552	0,27	0,00	0,06
	11	<b>-1,7000</b>	<b>-0,5000</b>	<b>-0,6000</b>	0,00	0,00	0,00
	12	<b>-1,7000</b>	<b>-0,5000</b>	-0,5989	0,00	0,00	0,06
	13	<b>-1,7000</b>	1,8910	<b>-0,6000</b>	0,00	1,00	0,00

No Quadro 4.5 são apresentados os valores *fuzzy membership*, utilizados na modelação pela Lógica *Fuzzy*, descrita na secção 4.3.3.

## 4. 3. 2. 1. Cartografia da susceptibilidade e validação a partir de taxas de sucesso

Para a elaboração dos mapas de susceptibilidade consideraram-se 4 classes de VI (Quadro 4.6), sendo o 0, o valor que divide as áreas com susceptibilidade reduzida a muito reduzida (VI negativos) das áreas com susceptibilidade moderada a elevada (VI positivos). A partir deste valor considerou-se o valor 1 na amplitude de cada classe, com excepção das classes das extremidades, classificadas com todos os valores superiores à unidade.

Quadro 4.6. Descrição dos níveis de susceptibilidade e respectiva área abrangida no Concelho.

Susceptibilidade (classificação qualitativa)	Scores VI					
	Deslizamentos Rotacionais	Área (%)	Deslizamentos Translacionais	Área (%)	Escoadas	Área (%)
<b>Elevada</b>	<b>&gt;1</b>	12,57	<b>&gt;1</b>	15,24	<b>&gt;1</b>	11,23
<b>Moderada</b>	<b>0 - 1</b>	5,09	<b>0 - 1</b>	19,99	<b>0 - 1</b>	10,99
<b>Reduzida</b>	<b>-1 - 0</b>	10,57	<b>-1 - 0</b>	21,99	<b>0 - -1</b>	13,34
<b>Muito reduzida</b>	<b>&lt;-1</b>	71,76	<b>&lt;-1</b>	42,78	<b>&lt;-1</b>	64,44

A distribuição da susceptibilidade pelo concelho é bastante diferenciada nos três tipos de movimentos de vertente (Fig. 4.4). Nas áreas xistentas (Várzea da Serra) há maior susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos rotacionais, enquanto na Serra de Santa Helena, a susceptibilidade à ocorrência de escoadas é mais elevada, com especial destaque para as vertentes voltadas para Tarouca, onde os deslizamentos translacionais também se demarcam com elevada susceptibilidade. A distribuição da susceptibilidade mais elevada destes últimos movimentos é mais abrangente, destacando-se no concelho, a coincidência com as áreas de maior declive. Relativamente às escoadas, destaca-se toda a serra de Santa Helena e pequenas manchas na área a S de São João de Tarouca e a N de Vila Chã da Beira.

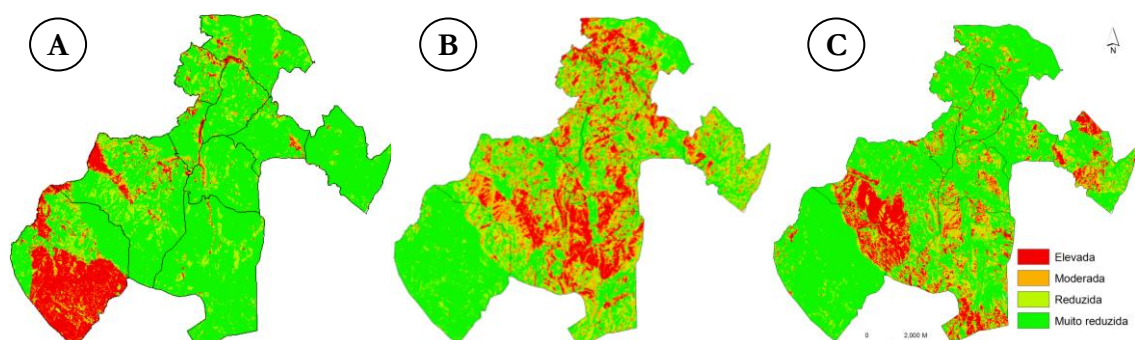


Figura 4.4. Mapas de susceptibilidade a movimentos de vertente, validados por taxas de sucesso. A – deslizamentos rotacionais; B - deslizamentos translacionais; C - escoadas.



No método de validação com curvas de sucesso os resultados obtidos de susceptibilidade são validados com todos os movimentos que lhe deram origem (128 movimentos).

As curvas de sucesso (Fig. 4.5) demonstram a eficiência dos modelos, indicando que em 1% da área total classificada como mais susceptível aos deslizamentos rotacionais regista-se cerca de 59% de área instabilizada por este tipo movimentos, aumentando para 77% aos 12% de área total classificada como susceptível e 95% aos 25%, respectivamente. Quanto aos deslizamentos translacionais, aos 20% da área de estudo classificados como mais susceptíveis, são validados 57% da área instabilizada, valor que aumenta para 95% se forem considerados 63% da área mais susceptível. Já no caso das escoadas, com 20% da área de estudo acumulada, está validada 70% da área instabilizada e nos 50% valida-se 95% da totalidade da área afectada.

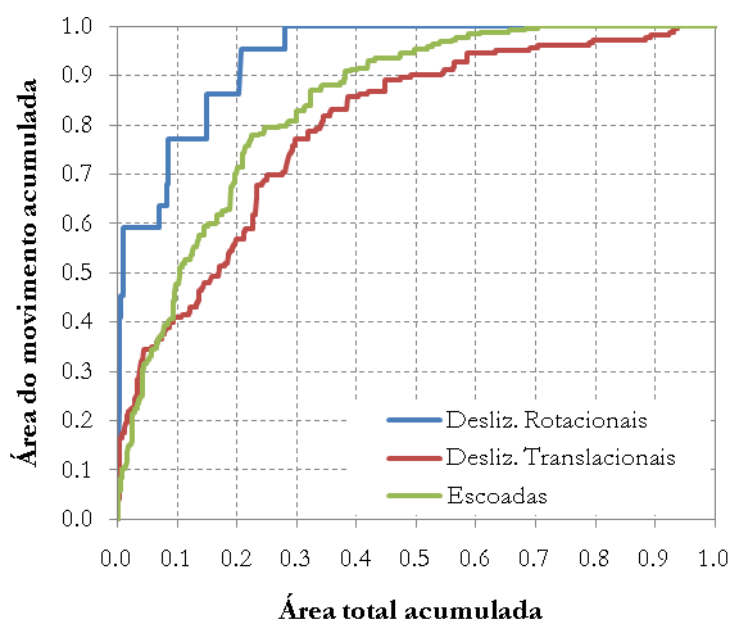


Figura 4.5. Curvas de sucesso para os deslizamentos rotacionais, translacionais e escoadas (método do VI).

#### 4. 3. 1. 2. Validação a partir de taxas de predição

No procedimento analítico deste método procedeu-se de igual forma à usada no ponto anterior (taxas de sucesso), mas com apenas metade dos movimentos validados. Esta análise foi feita individualmente para cada tipo de movimento de vertente, sendo a variável dependente alvo de partição aleatória em dois grupos com áreas semelhantes. Metade dos

movimentos integrou a modelação da susceptibilidade e os restantes serviram para validar os resultados obtidos (Fig. 3.8).

Para a aplicação desta metodologia fez-se a partição aleatória do inventário total dos movimentos (128), resultando dois inventários (A e B), correspondendo cada um aproximadamente a metade da área instabilizada da área total por cada tipologia de movimento de vertente. O inventário A serviu para fazer a modelação, sendo este composto por 82 deslizamentos (6 rotacionais e 76 translacionais) e 19 escoadas. O inventário B serviu para a validação dos resultados de susceptibilidade obtidos anteriormente, sendo este composto por 16 deslizamentos (4 rotacionais e 12 translacionais) e 9 escoadas.

Os mapas de susceptibilidade obtidos pelo modelo de predição através do método dos VI, com base no inventário A, demonstram resultados um pouco semelhantes aos obtidos no modelo de sucesso (comparação visual), nomeadamente, na definição das “mesma áreas” com maior susceptibilidade nos diferentes tipos de movimentos (Fig. 4.6). Nos deslizamentos rotacionais destaca-se a área xistenta de Várzea da Serra e as áreas de aluviões no fundo de Vale do Varosa, enquanto nos deslizamentos translacionais, as vertentes do sector jusante deste vale, em conjunto com grande parte da área de menor declive da Freguesia de Tarouca, são as áreas de maior susceptibilidade. Nas escoadas, destacam-se as vertentes da Serra de Santa Helena e as vertentes da margem direita do Rio Varosa, localizadas na Freguesia de São João de Tarouca, embora nestas últimas, a área mais susceptível tenha aumentado, face aos resultados obtidos pelo modelo de susceptibilidade anterior.

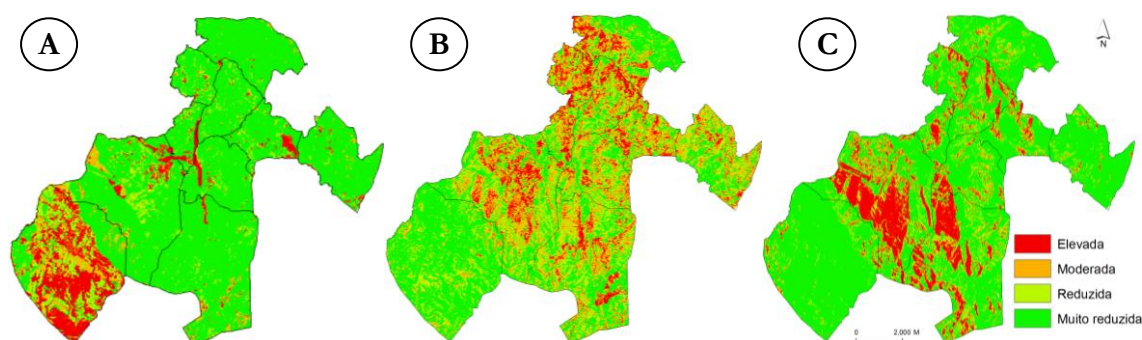


Figura 4.6. Mapas de susceptibilidade a movimentos de vertente, validados por taxas de predição. A – deslizamentos rotacionais; B - deslizamentos translacionais; C - escoadas.

Pese embora as semelhanças atrás referidas, as curvas de predição (Fig. 4.7) demonstram a fraca eficiência deste método na modelação da susceptibilidade aos diferentes tipos de

movimentos de vertente na área de estudo, facto que não será alheio ao número reduzido de movimentos de vertente utilizados para modelar e validar, o que retira consistência aos modelos. Com efeito, considerando a curva dos deslizamentos rotacionais, em 48% da área de estudo acumulada são validados apenas de 19% de área instabilizada acumulada. As curvas dos deslizamentos translacionais e escoadas reflectem igualmente a perda de consistência dos modelos baseados na partição da variável dependente, uma vez que se verifica que para a validação de 60% de área instabilizada são necessários aproximadamente 64 e 45% da área total acumulada, respectivamente.

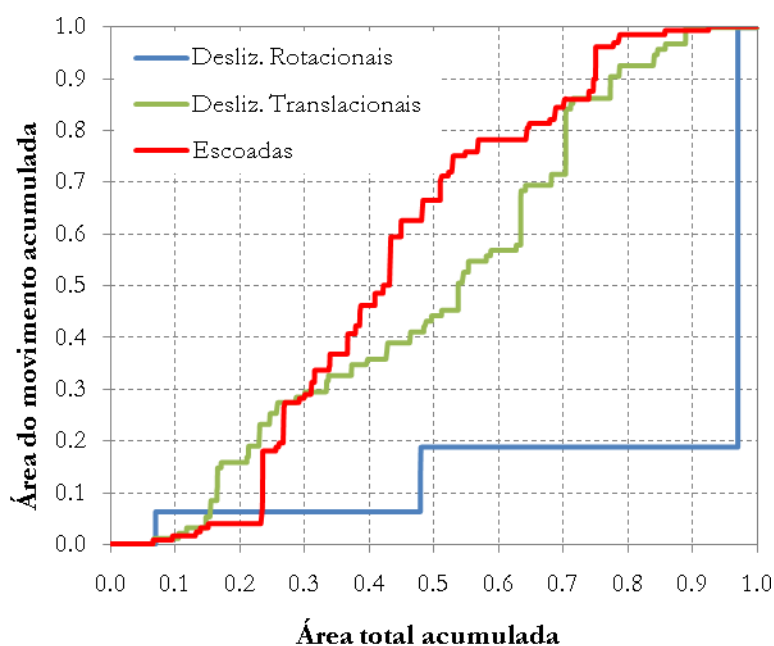


Figura 4.7. Curvas de predição para os deslizamentos rotacionais, translacionais e escoadas.

#### 4.3.3. LÓGICA FUZZY

Na modelação da susceptibilidade a partir deste método utilizaram-se os valores *fuzzy membership* referidos no Quadro 4.4. Na primeira fase utilizou-se o operador Sum e, posteriormente, recorreu-se ao operador Gamma, integrando este último, resultados derivados da combinação dos valores “fuzificados” pelo operador Sum e Algebraic Product, como referido anteriormente. No operador Gamma é necessário definir o parâmetro  $\gamma$  (Equação 3.8) optando-se, neste caso, pela utilização do valor 0,9 definido por defeito na ferramenta ArcSdm.

#### 4. 3. 3. 1. Operador Sum

Para a representação espacial da susceptibilidade consideraram-se 4 classes com amplitude de 0,25 (Quadro 4.7). Nos deslizamentos rotacionais, a classe de maior susceptibilidade compreende a maioria da área de estudo (90,85%), sendo os restantes 9,15% classificados com as classes de susceptibilidade inferior. Já nos deslizamentos translacionais, a classe mais representativa é da susceptibilidade moderada (74,30% da área total), seguindo-se a classe de susceptibilidade elevada (19,56%) e reduzida (6,14%), não se registando valores na classe de menor susceptibilidade. Relativamente às escoadas, as classes de susceptibilidade reduzida e moderada compreendem a maioria da área de estudo (58,21 e 38,78% respectivamente), havendo apenas 0,77% da área total classificada como mais susceptível.

Quadro 4.7. Descrição dos níveis de susceptibilidade para o operador Sum da Lógica *Fuzzy* e respectiva área abrangida no concelho.

Susceptibilidade (classificação qualitativa)	Scores Sum					
	Deslizamentos Rotacionais	Área (%)	Deslizamentos Translacionais	Área (%)	Escoadas	Área (%)
<b>Elevada</b>	<b>0,75 - 1</b>	90,85	<b>0,75 - 1</b>	19,56	<b>0,75 - 1</b>	0,77
<b>Moderada</b>	<b>0,5 - 0,75</b>	1,61	<b>0,5 - 0,75</b>	74,30	<b>0,5 - 0,75</b>	38,78
<b>Reduzida</b>	<b>0,25 - 0,5</b>	4,93	<b>0,25 - 0,5</b>	6,14	<b>0,25 - 0,5</b>	58,21
<b>Muito reduzida</b>	<b>0 - 0,25</b>	2,61	<b>0 - 0,25</b>	0,00	<b>0 - 0,25</b>	2,24

Pela representação espacial dos resultados de susceptibilidade obtidos por este operador observam-se grandes variações em função do tipo de movimento de vertente presente (Fig. 4.8). No mapa de susceptibilidade a movimentos rotacionais a classe mais elevada abrange a quase totalidade da área de estudo, não se coadunando com as observações efectuadas no terreno. Estes resultados traduzem a fraca eficiência deste método, por não produzirem grande diferenciação da susceptibilidade mais elevada, em função das condicionantes presentes nas áreas onde efectivamente ocorreram estes movimentos, das restantes áreas, como acontece no método do VI. Porém, na representação cartográfica da susceptibilidade a deslizamentos translacionais, há maior diferenciação espacial entre classes, sendo as áreas classificadas com susceptibilidade muito elevadas muito semelhantes às obtidas pelo método do VI, embora no método *Fuzzy Sum* as áreas classificadas com susceptibilidade moderada sejam mais extensas. Nas áreas de susceptibilidade mais elevada à ocorrência de

escoadas destaca-se a Serra de Santa Helena, demarcando-se nesta, os terrenos com quartzito.

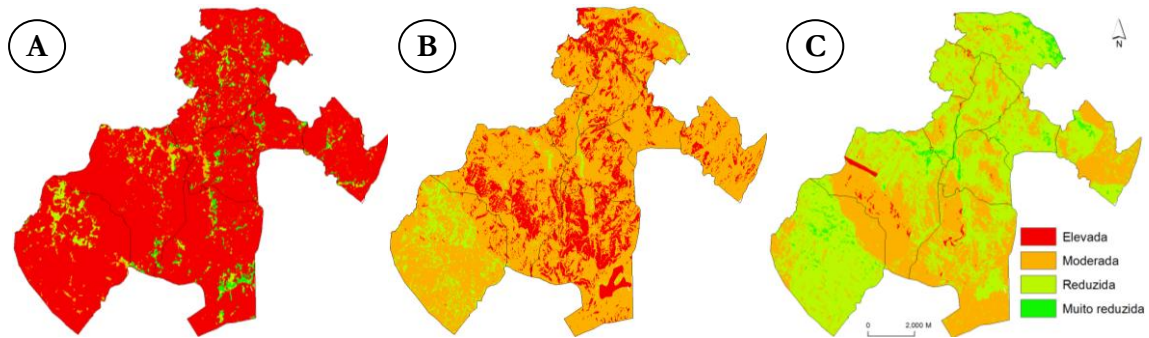


Figura 4.8. Mapas de susceptibilidade a movimentos de vertente, obtidos pelo operador Sum da Lógica *Fuzzy*. A – deslizamentos rotacionais; B - deslizamentos translacionais; C - escoadas.

As curvas de sucesso obtidas para os resultados de susceptibilidade gerados por este operador (Fig. 4.9) apresentam menor variação entre elas, quando comparadas com as relativas ao VI. Nestas há uma variação na ordem dos 12% de área total acumulada (e.g. considerando-se 10% da área de estudo, 50% da área total instabilizada das escoadas é validada, enquanto nos deslizamentos translacionais para a mesma área instabilizada, são necessários 20% da área de estudo).

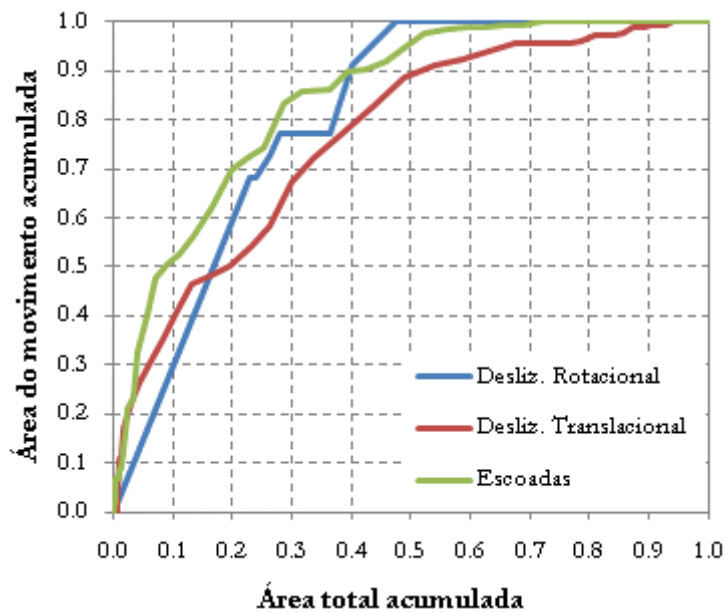


Figura 4.9. Curvas de sucesso dos modelos de susceptibilidade produzidos com o operador Sum (soma algébrica) da Lógica *Fuzzy* para os deslizamentos rotacionais, translacionais e escoadas.

Considerando 30% da área de estudo são validados cerca de 70% de área instabilizada acumulada dos deslizamentos translacionais, 77% dos deslizamentos rotacionais e 85% das escoadas, sendo estas áreas instabilizadas totalmente validadas, aos 94, 46 e 73% da área de estudo acumulada, respectivamente.

#### 4.3.3.2. Operador Gamma

Para a representação espacial da susceptibilidade obtida a partir deste operador, considerou-se o mesmo número de classes dos métodos anteriores. As classes de menor susceptibilidade têm uma amplitude de 0,1, enquanto a classe de susceptibilidade mais elevada compreende todos os valores superiores a 0,3 (Quadro 4.8).

Quadro 4.8. Descrição dos níveis de susceptibilidade para o operador Gamma da Lógica *Fuzzy* e respectiva área abrangida no concelho.

Susceptibilidade (classificação qualitativa)	Scores Gamma					
	Deslizamentos Rotacionais	Área (%)	Deslizamentos Translacionais	Área (%)	Escoadas	Área (%)
<b>Elevada</b>	<b>&gt;0,3</b>	0,19	<b>&gt;0,3</b>	0,58	<b>&gt;0,3</b>	0,00
<b>Moderada</b>	<b>0,2 – 0,3</b>	6,24	<b>0,2 – 0,3</b>	31,68	<b>0,2 – 0,3</b>	0,21
<b>Reduzida</b>	<b>0,1 – 0,2</b>	13,39	<b>0,1 – 0,2</b>	40,96	<b>0,1 – 0,2</b>	7,84
<b>Muito reduzida</b>	<b>0 – 0,1</b>	80,18	<b>0 – 0,1</b>	26,78	<b>0 – 0,1</b>	91,95

Os valores de susceptibilidade obtidos com este operador, quando classificados e representados espacialmente (Fig. 4.10), demonstram grande variação no território. Nos deslizamentos rotacionais a área xistenta de Várzea de Serra apresenta algumas manchas com elevada susceptibilidade, em paralelo com as áreas xistentas localizadas a N da Serra de Santa Helena.

Já nos deslizamentos translacionais, as áreas xistentas são as que apresentam os resultados de susceptibilidade mais reduzidos, demarcando-se todas as vertentes do Vale do Varosa, com especial destaque para as vertentes localizadas na Freguesia de São João de Tarouca e no Monte Raso, com valores elevados. A susceptibilidade a escoadas demarca-se na Serra de Santa Helena, coincidindo os valores mais elevados com as áreas onde ocorreram efectivamente os movimentos de vertente deste tipo, sendo a restante área de estudo classificada de susceptibilidade reduzida a muito reduzida.

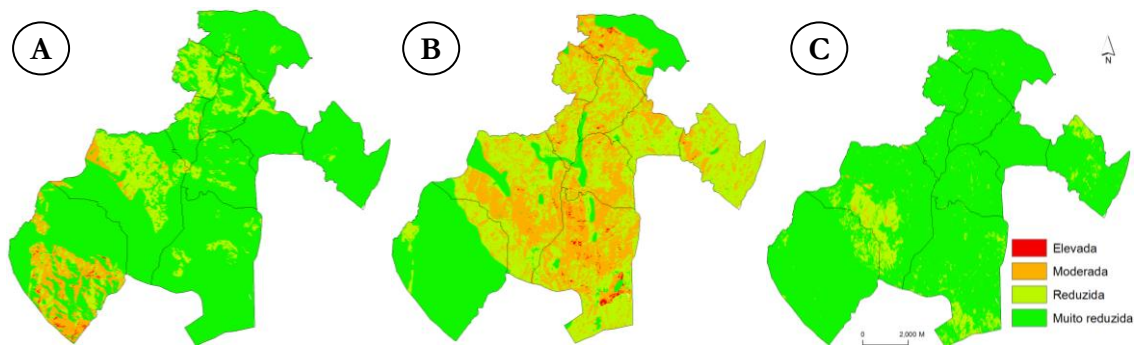


Figura 4.10. Mapas de susceptibilidade a movimentos de vertente, obtidos pelo operador Gamma da Lógica *Fuzzy*. A – deslizamentos rotacionais; B - deslizamentos translacionais; C - escoadas.

A curva de sucesso dos deslizamentos rotacionais (Fig. 4.11) demonstra a eficiência deste modelo na determinação da susceptibilidade para este tipo de movimentos, uma vez que com apenas 1% da área total classificada como mais susceptível é validada cerca de 59% da área total instabilizada, encontrando-se esta totalmente validada com apenas 14% da área total.

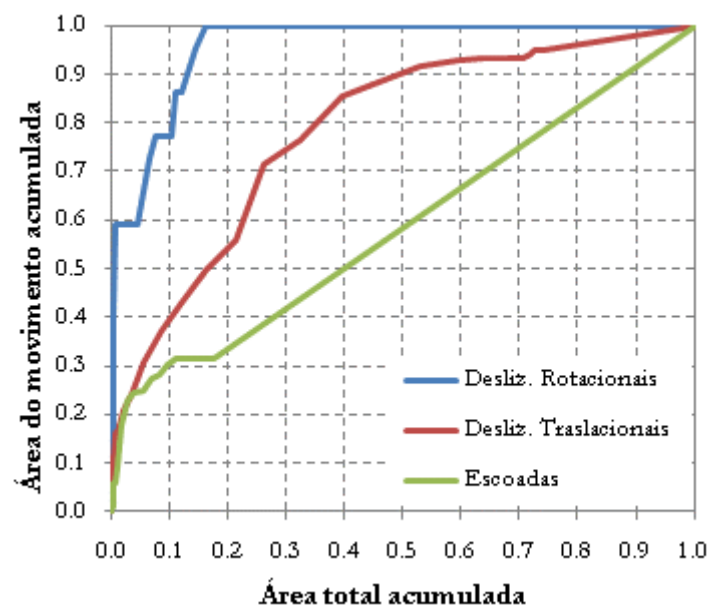


Figura 4.11. Curvas de sucesso dos modelos de susceptibilidade produzidos com o operador Gamma da Lógica *Fuzzy* para os deslizamentos rotacionais, translacionais e escoadas.

Relativamente à curva dos deslizamentos translacionais, embora seja bastante robusta, demonstra menor eficiência do modelo na determinação da susceptibilidade, quando comparada com a curva anterior: os mesmos 59% de área total instabilizada são validados

com 21% da área de estudo classificada como mais susceptível. Já a curva das escoadas, ilustra a fraca eficiência deste modelo, ou seja, se considerarmos os mesmos 21% da área de estudo acumulada, são validados apenas cerca de 34% de área instabilizada por este tipo de movimento. Nestas duas últimas curvas, é necessário considerar toda a área de estudo para validar a totalidade da área instabilizada.

#### 4.3.4. COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS PREDITIVOS

Ao compararem-se visualmente as curvas de sucesso e predição dos vários modelos de susceptibilidade por tipologia de movimento (Fig. 4.12), verifica-se que nos deslizamentos rotacionais o modelo que melhores resultados apresenta para a área de estudo é o operador Gamma da Lógica *Fuzzy*, desatacando-se este, também, nos deslizamentos translacionais, com elevada similaridade aos resultados obtidos pelo método do VI. Nas escoadas, os modelos produzidos com o operador Sum da Lógica *Fuzzy* e com o VI, embora com pequenas variações, sobressaem dos restantes. Como seria de esperar, a curva de predição obtida com o método do VI a partir de uma pequena amostra independente de movimentos apresenta resultados de menor qualidade, comparativamente a todas as curvas de sucesso, como se comprova pela observação da Figura 4.12.

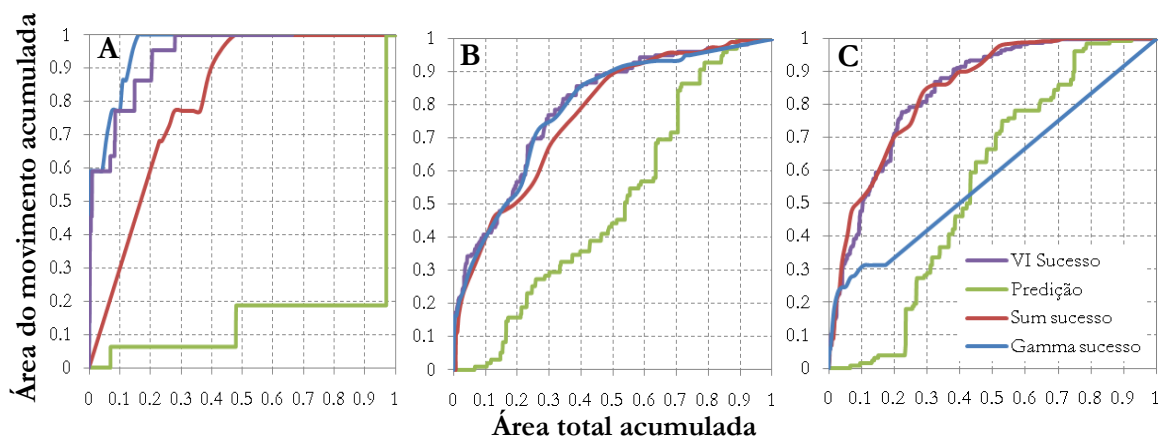


Figura 4.12. Curvas sucesso e predição dos modelos de susceptibilidade produzidos para o Concelho de Tarouca, para diferentes tipologias de movimentos de vertente. A - deslizamentos rotacionais; B - deslizamentos translacionais; C - escoadas.

Para a quantificação das diferenças verificadas entre os vários modelos de susceptibilidade determinou-se a Área Abaixo da Curva (AAC) para cada modelo efectuado. Considerando os três tipos de movimentos de vertente, o modelo que apresenta melhores resultados é o



VI com validação por taxas de sucesso, como se pode verificar pela observação do Quadro 4.9.

Considerando a tipologia dos movimentos, são os deslizamentos rotacionais que registam maior amplitude na variação entre os resultados obtidos pelos vários modelos (0,8129), destacando-se o valor elevado obtido pelo operador Gamma da Lógica *Fuzzy* (0,9600), resultado que demonstra a elevada performance do mesmo. Este método também se destaca nos deslizamentos translacionais, embora o valor mais elevado de AAC seja o obtido por VI com validação por taxas de sucesso. Relativamente às escoadas, o melhor resultado obteve-se com o operador Sum da Lógica *Fuzzy* (0,8444).

Quadro 4.9. Área Abaixo da Curva dos modelos preditivos.

Modelo de Susceptibilidade	Deslizamentos rotacionais	Deslizamentos translacionais	Escoadas	MÉDIA
VI (taxas de sucesso)	0,9381	0,7940	0,8419	0,8580
VI (taxas de predição)	0,1471	0,5016	0,5595	0,4027
<i>Fuzzy</i> Sum (taxas de sucesso)	0,8062	0,7669	0,8444	0,8058
<i>Fuzzy</i> Gamma (taxas de sucesso)	0,9600	0,7871	0,5887	0,7786
AMPLITUDE DE VARIAÇÃO	0,8129	0,2924	0,2849	0,3646

#### 4. 5. IMPORTÂNCIA DE CADA FACTOR DE PREDISPOSIÇÃO NA MODELAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE

As variáveis que integraram a modelação da susceptibilidade a movimentos de vertente, têm uma importância diferenciada na ocorrência dos movimentos. Para a determinação do peso de cada uma, recorreu-se aos índices *accountability* e *reability*, apresentados por BLAHUT *et al.* (2010).

As probabilidades *a priori* e probabilidades condicionadas, apresentadas nos Quadros 4.3 e 4.4, serviram de base para o cálculo destes índices, apresentando-se os resultados obtidos no Quadro 4.10.

Quadro 4.10. Índices *accountability* e *reliability* para os vários factores de predisposição usados na modelação da susceptibilidade. Os valores a negrito destacam os factores mais importantes no conjunto dos mapas temáticos nos dois parâmetros.

Variáveis	<i>Accountability (A)</i>			<i>Reliability (R)</i>		
	Rotac.	Transl.	Escoada	Rotac.	Transl.	Escoada
Declive	77,27	45,90	28,63	0,0049	0,0244	0,0000
Exposição	9,09	45,36	<b>93,13</b>	0,0020	<b>0,0372</b>	0,0375
Curvatura	95,45	53,55	65,65	0,0024	0,0236	0,0414
Geologia	9,09	<b>92,35</b>	87,79	0,0000	0,0000	0,0000
NDVI	31,30	78,14	68,18	<b>0,0357</b>	0,0000	0,0065
Uso do solo	77,27	73,77	87,02	0,0029	0,0230	0,0388
Solo	<b>100,00</b>	86,34	73,66	0,0061	0,0292	<b>0,0473</b>

Nos deslizamentos rotacionais a variável “Solo” revela-se mais importante ( $A=100$ ). Como foi referido anteriormente, estes movimentos ocorrem com frequência na área de aplanção poligénica (superfície fundamental), onde predominam os Leptosolos úmbricos em áreas de xisto e rochas afins, revelando-se estas características pedológicas importantes na ocorrência destes eventos. Nestas áreas predominam os cabeços arredondados com vertentes côncavas, característica morfológica que se manifesta relevante na ocorrência destes movimentos (Curvatura das vertentes = 95,45). Quanto ao índice R, a variável NDVI destaca-se das restantes, por apresentar uma densidade média de deslizamentos rotacionais nas classes com probabilidades condicionadas superiores à probabilidade *a priori*.

No caso dos deslizamentos translacionais, a variável que mais se destaca é a “Geologia” ( $A=92,35$ ). Com efeito, as classes desta variável com probabilidades condicionadas superiores à probabilidade *a priori* apresentam elevada área deslizada (86,4% da área total afectada) o que torna a variável mais relevante face às restantes. No factor R evidencia-se a exposição das vertentes, revelando este indicador a elevada densidade média de deslizamentos nas classes consideradas.

Quanto às escoadas, a exposição das vertentes sobressai das restantes ( $A=93,13$ ), sendo a variável mais importante na ocorrência deste tipo de movimento. A maioria destes movimentos ocorre nas classes W, SW, SE, E e NE (93,1% da área total instabilizada), que apresentam probabilidades condicionadas superiores à probabilidade *a priori*. Relativamente à densidade média de escoadas, destaca-se a variável “Solo” por apresentar classes mais importantes na ocorrência destes movimentos ( $R=0,0473$ ).

Admitindo o peso de cada factor de predisposição na ocorrência dos vários movimentos de vertente, achou-se pertinente saber como influenciam a distribuição da susceptibilidade na

área de estudo. Para esta análise consideraram-se os resultados obtidos pelo método do VI com validação por taxas de sucesso, devido à robustez dos resultados obtidos por este modelo.

Os factores de instabilidade foram hierarquizados em função dos resultados do índice *accountability* e a análise iniciou-se pela construção dos mapas de susceptibilidade para cada um dos três tipos de movimentos, apenas com a variável que se revelou mais importante (e.g. deslizamentos rotacionais com a variável “Solo”), adicionando-se, num segundo momento, a segunda variável mais importante (e.g. “Solo” e “Curvatura” para o mesmo tipo de movimento) e respectiva construção dos mapas, processos que se repetiram, sucessivamente, até se introduzirem as sete variáveis independentes (na sequência de somatórios obedeceu-se à ordem expressa nos Quadros 4.11, 4.12 e 4.13). Todos os mapas foram reclassificados de acordo as classes expressas no Quadro 4.6, determinando-se, posteriormente, a respectiva área por cada classe de susceptibilidade nos sete mapas elaborados para cada tipo de movimento.

Quadro 4.11. Ordem e quantidade de variáveis consideradas nas várias combinações para a determinação da susceptibilidade a deslizamentos rotacionais.

N.º de variáveis	A	Variáveis							
1	100,00	Solo							
2	95,45	Solo	Curvatura						
3	77,27	Solo	Curvatura	Declive					
4	77,27	Solo	Curvatura	Declive	Uso do solo				
5	31,30	Solo	Curvatura	Declive	Uso do solo	NDVI			
6	9,09	Solo	Curvatura	Declive	Uso do solo	NDVI	Exposição		
7	9,09	Solo	Curvatura	Declive	Uso do solo	NDVI	Exposição	Geologia	

Nos deslizamentos rotacionais, considerando apenas a variável Solo, 64% da área de estudo está classificada com susceptibilidade muito reduzida, subdividindo-se os restantes 36% pelas classes moderada e elevada (22,8 e 13,2%, respectivamente), como se pode observar na Figura 4.13. Com a introdução da variável “Curvatura”, verifica-se uma redução da área que integra as classes mais elevadas e um aumento da área da classe reduzida para os 2,4% do total. A variação mais acentuada verifica-se quando se considera a variável “Declive”, ao constatar-se a redução da área das classes elevada, moderada e muito reduzida (7,1, 10,2 e 56,1%, respectivamente) e o aumento da área da classe reduzida para os 26,1%. Considerando as variáveis “Uso do solo”, “NDVI” e “Exposição”, as variações são reduzidas, verificando-se que, quando se integra a variável “Geologia”, aumenta a área das

classes muito reduzida e elevada, diminuindo a área das classes intermédias. Contudo, verifica-se que ao longo dos somatórios das diversas variáveis a classe muito reduzida compreendeu sempre mais de 56% da área de estudo.

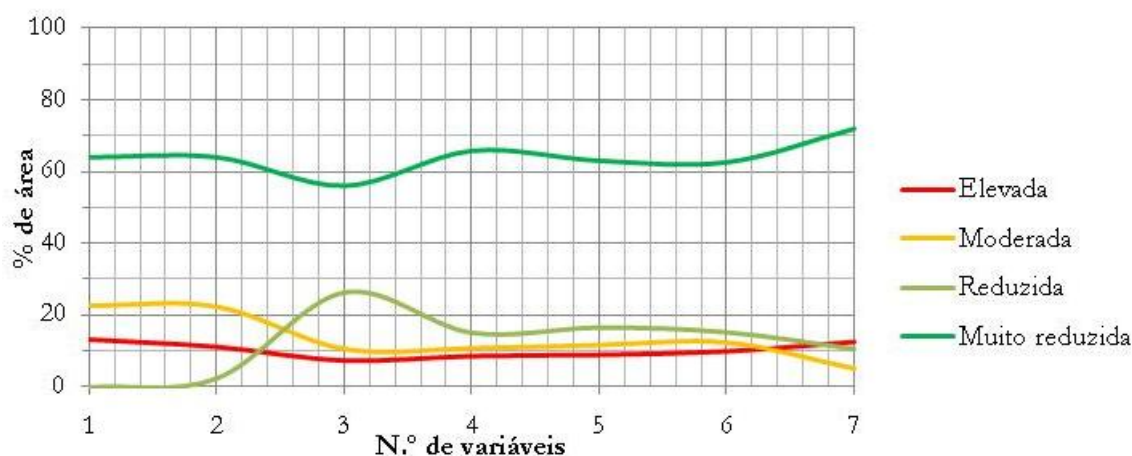


Figura 4.13. Variação da percentagem de área por classe de susceptibilidade a deslizamentos rotacionais, considerando a hierarquia dos vários factores de predisposição derivada do índice *accountability*.

O Quadro 4.12 ilustra a hierarquia das variáveis independentes para a explicação dos deslizamentos translacionais, de acordo com o índice *accountability*.

Quadro 4.12. Ordem e quantidade de variáveis consideradas nas várias combinações para a determinação da susceptibilidade a deslizamentos translacionais.

N.º de variáveis	A	Variáveis							
1	92,35	Geologia							
2	86,34	Geologia	Solo						
3	78,14	Geologia	Solo	NDVI					
4	73,77	Geologia	Solo	NDVI	Uso do solo				
5	53,55	Geologia	Solo	NDVI	Uso do solo	Curvatura			
6	45,90	Geologia	Solo	NDVI	Uso do solo	Curvatura	Declive		
7	45,36	Geologia	Solo	NDVI	Uso do solo	Curvatura	Declive	Exposição	

A susceptibilidade a deslizamentos translacionais, determinada unicamente com a variável “Geologia”, apresenta-se distribuída apenas pelas classes muito reduzida, reduzida e moderada (21,2, 5,5 e 73,3%, respectivamente). Com a sucessiva introdução de variáveis, verifica-se a redução da área classificada como moderada e o aumento da área classificada como muito reduzida (Fig. 4.14).

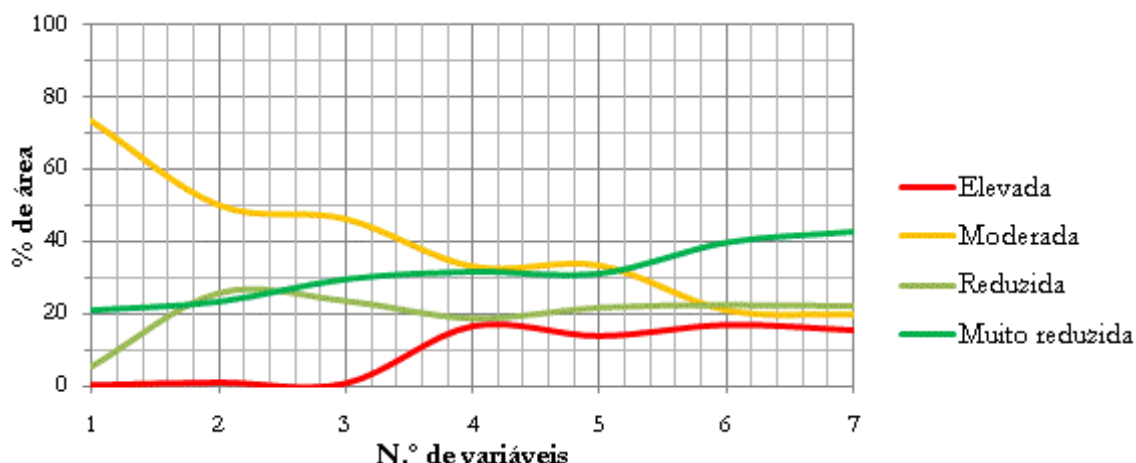


Figura 4.14. Variação da percentagem de área por classe de susceptibilidade a deslizamentos translacionais, considerando a hierarquia dos vários factores de predisposição derivada do índice *accountability*.

O “Uso do Solo” influencia a susceptibilidade do território a este tipo de movimentos, ao proporcionar um aumento de cerca de 15% da área da classe mais elevada. Já as variáveis “Curvatura”, “Declive” e “Exposição”, quando adicionadas às restantes, proporcionam pouca variação das classes elevada e reduzida, aumentando somente a área da classe de susceptibilidade muito reduzida quando se considera o factor Declive.

Para a análise da variação da susceptibilidade a escoadas com as diferentes variáveis, foi considerada a hierarquia apresentada no Quadro 4.13.

Quadro 4.13. Ordem e quantidade de variáveis consideradas nas várias combinações para a determinação da susceptibilidade a escoadas.

N.º de variáveis	A	Variáveis							
1	93,13	Exposição							
2	87,79	Exposição	Geologia						
3	87,02	Exposição	Geologia	Uso do solo					
4	73,66	Exposição	Geologia	Uso do solo	Solo				
5	68,18	Exposição	Geologia	Uso do solo	Solo	NDVI			
6	65,65	Exposição	Geologia	Uso do solo	Solo	NDVI	Curvatura		
7	28,63	Exposição	Geologia	Uso do solo	Solo	NDVI	Curvatura	Declive	

No caso das escoadas, a área da classe muito reduzida aumentou progressivamente na adição das diversas variáveis, embora com menor expressão, quando consideradas as últimas cinco variáveis (Fig. 4.15). As variáveis “NDVI”, “Curvatura” e “Declive”,

manifestaram-se pouco relevantes na variação da área classificada nas várias classes de susceptibilidade pelas cinco primeiras variáveis, infligindo apenas uma ligeira redução da área das classes intermédias.

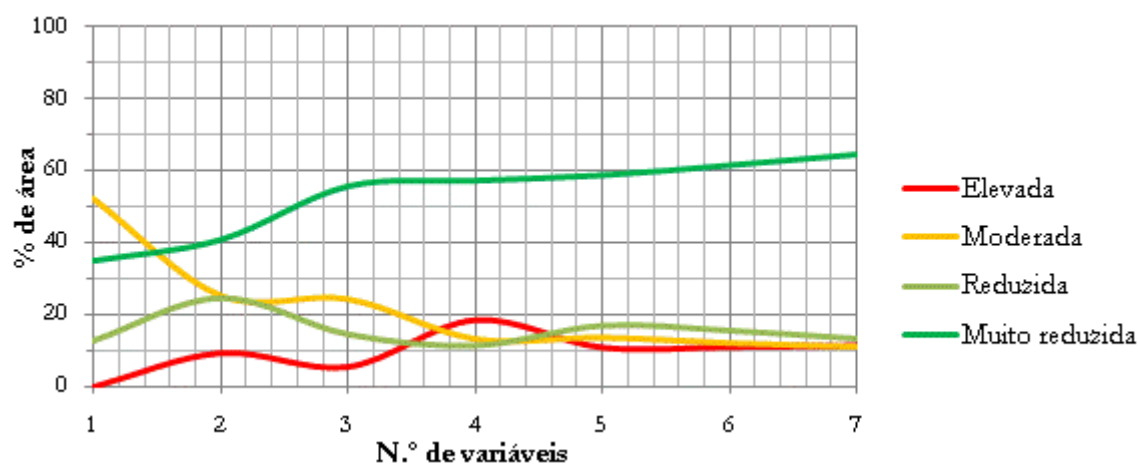


Figura 4.15. Variação da percentagem de área por classe de susceptibilidade a escoadas, considerando a hierarquia dos vários factores de predisposição derivada do índice *accountability*.

As variáveis “Declive”, “Geologia”, “Exposição” e “Solo” são as que se manifestam mais importantes na modelação da susceptibilidade, por induzirem grandes variações da área que integra cada classe de susceptibilidade a qualquer dos tipos de movimentos de vertente considerados. As três últimas variáveis (“Curvatura”, “NDVI” e “Uso do solo”), embora não se tenham manifestado muito importantes nesta modelação, permitiram aferir com maior exactidão as áreas mais susceptíveis nos três tipos de movimentos em análise, apresentando resultados mais coerentes com as áreas instabilizadas validadas no campo.

Numa análise geral, em todos os movimentos, quando adicionadas todas as variáveis há uma redução da área da classe de susceptibilidade moderada e um aumento da área da classe muito reduzida. Relativamente à susceptibilidade elevada, nunca ultrapassou os 30% de área total para qualquer dos três tipos de movimentos, verificando-se que a partir do somatório da quarta variável há uma tendência para reduzir ou estabilizar.

Assim, considera-se o conjunto das variáveis independentes fundamental para a aferição das áreas susceptíveis aos vários movimentos de vertente, verificando-se ao longo dos vários processos um ajustamento das áreas de cada classe de susceptibilidade, indo de encontro às observações das áreas instabilizadas, realizadas no campo. No entanto, ao

longo dos vários processos, pode existir informação redundante, quando é feita uma análise individual para cada tipologia de movimentos de vertente.

#### 4. 6. SUSCEPTIBILIDADE DO TERRITÓRIO A MOVIMENTOS DE VERTENTE, SEGUNDO AS ÁREAS A INTEGRAR A REN

Os mapas de susceptibilidade elaborados a partir do Método do VI (validados pelas taxas de sucesso) para cada movimento são os que apresentam melhores resultados, conforme demonstrado anteriormente pela comparação qualitativa e quantitativa com os métodos de Lógica Fuzzy. Assim, apenas foram considerados os resultados do VI para a construção do mapa final de susceptibilidade a movimentos de vertente na área de estudo, tendo em conta todas as variáveis independentes.

Para a construção deste mapa, consideraram-se as orientações estratégicas de âmbito nacional para as tipologias de áreas integradas em REN (DGOTDU, 2010). Segundo estas, a área a integrar este Plano deve ser a suficiente para garantir a inclusão de uma fracção nunca inferior a 70% das áreas identificadas como instabilizadas.

Considerando este valor de referência, reclassificaram-se os mapas da susceptibilidade entre 0 e 1 (Quadro 4.14). O valor 1 corresponde ao *score* de VI acima do qual estão validados 70% da área total instabilizada, enquanto o valor 0, corresponde ao *score* de VI abaixo deste valor.

Quadro 4.14. Percentagem de área deslizada acumulada considerada para a construção do mapa de susceptibilidade a movimentos de vertente.

Mapa de susceptibilidade	Área instabilizada acumulada $\geq 70\%$			Área instabilizada acumulada $< 30\%$		
	Área do Concelho (%)	VI	ID	Área do Concelho (%)	VI	ID
Desliz. Rotacionais	8,53	$\geq 1,7460$	1	91,10	$< 1,7460$	0
Desliz. Translacionais	27,54	$\geq 0,3520$	1	72,46	$< 0,3520$	0
Escoadas	19,64	$\geq 0,1940$	1	80,36	$< 0,1940$	0

Com os mapas reclassificados fez-se o seu somatório, resultando desta operação o mapa final de susceptibilidade a movimentos de vertente (Fig. 4.16). As áreas classificadas como de susceptibilidade elevada, são aquelas em que o somatório dos mapas deu resultado 3, ou seja, trata-se de áreas susceptíveis, em simultâneo, aos 3 tipos de movimentos de vertente

considerados. Quando o resultado do somatório é 2 a susceptibilidade é considerada moderada. Trata-se, neste caso, de áreas bastante susceptíveis a 2 dos 3 tipos de movimentos de vertente estudados. A susceptibilidade reduzida corresponde a casos em que o resultado do somatório é 1, indicando susceptibilidade elevada a um tipo específico de movimento de vertente. Já a área classificada como susceptibilidade muito reduzida, dominante no concelho (54,02%), denuncia o resultado nulo do somatório dos três mapas. As áreas de susceptibilidade reduzida, moderada e elevada correspondem a 36,30%, 9,64% e 0,04%, respectivamente, da área total.

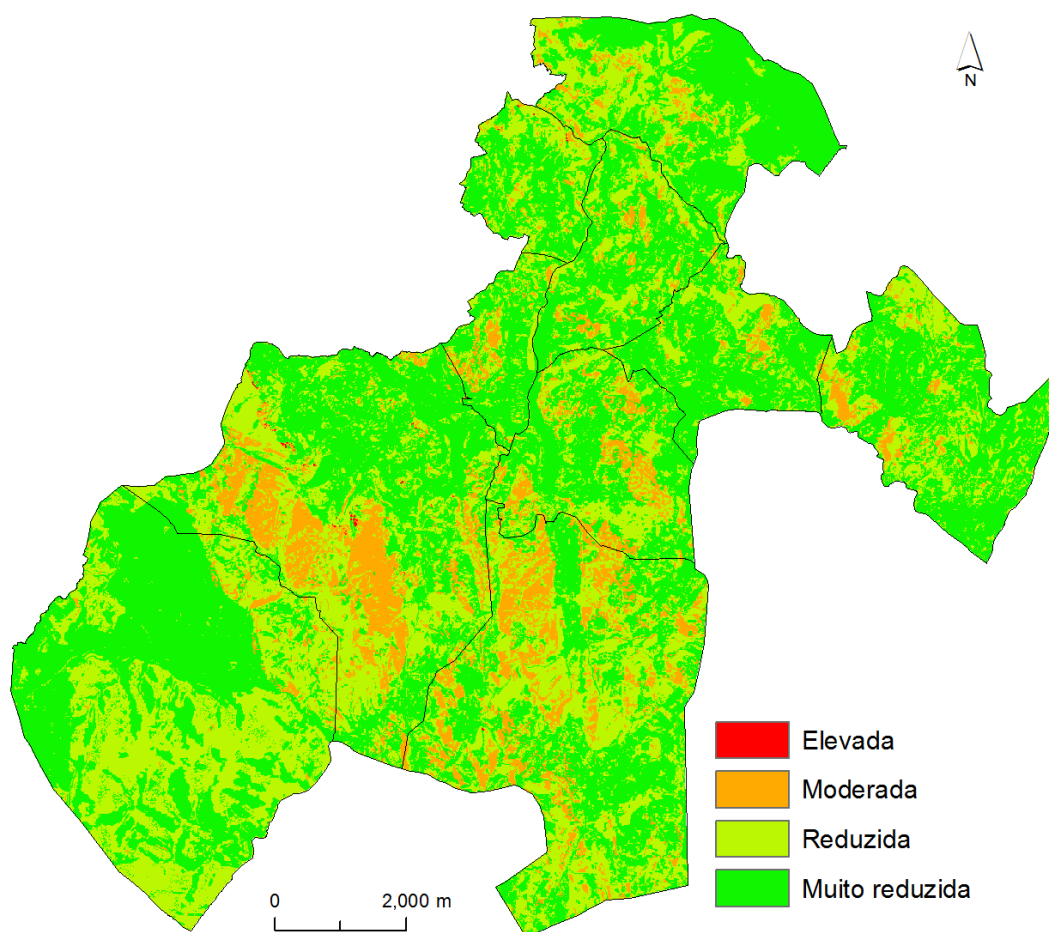


Figura 4.16. Susceptibilidade do território do Concelho de Tarouca a movimentos de vertente.

As duas classes de susceptibilidade mais elevada têm forte incidência em áreas de forte declive, como são exemplo as vertentes da Serra de Santa Helena voltadas para Tarouca e as vertentes do Vale do Varosa junto à localidade de São João de Tarouca. O monte de Santa Bárbara (Dalvares), o sector E da Freguesia de Vila Chã da Beira (maior entalhe da rede hidrográfica) e algumas áreas das vertentes do Monte Raso também apresentam



valores moderados a elevados de susceptibilidade. Estas são as áreas mais susceptíveis à ocorrência dos próximos movimentos de vertente.

Nas áreas de susceptibilidade mais reduzida destaca-se as áreas de fundo de vale, principalmente o fundo do Vale do Varosa e do Vale da Ribeira de Tarouca. As áreas de declive pouco acentuado também sobressaem com fraca susceptibilidade (e.g. área xistenta de Várzea da Serra).



## **CAPÍTULO 5 - RISCO DE MOVIMENTOS DE VERTENTE E CONDICIONALISMOS DERIVADOS DA PERDA DE INFRA- ESTRUTURAS ESTRATÉGICAS**

### **5. 1. LOCALIZAÇÃO E AVALIAÇÃO QUALITATIVA DO RISCO DE MOVIMENTOS DE VERTENTE**

Face à informação disponível em relação aos elementos em risco, foi apenas possível determinar a localização do risco e não efectuar uma análise de risco completa. Para a análise do risco seria necessário obter as componentes vulnerabilidade e perigosidade. Estas não se determinaram, porque não existe informação suficiente sobre a composição dos elementos expostos, nomeadamente o seu valor e o respectivo grau de perda em resultado da ocorrência de um movimento de vertente de determinada magnitude. Adicionalmente, falta informação relativa ao período de recorrência das manifestações de instabilidade. Neste contexto, elaborou-se a Carta de Localização do Risco, tendo por base a Carta de Elementos Expostos e a Carta de Susceptibilidade a movimentos de vertente. Como complemento, inseriu-se o factor distância/tempo percorrido a partir de um equipamento operacional (BVT), admitindo a perda de reacção dos meios operacionais de socorro às eventuais vítimas resultantes destes eventos em áreas mais afastadas do Concelho de Tarouca (Anexo 3).

Pela observação da Carta de Elementos Expostos (Fig. 5.1) verifica-se maior concentração destes elementos na Freguesia de Tarouca. Esta freguesia destaca-se das restantes, pela forte concentração populacional, localização de equipamentos estratégicos e centros de decisão.

Quanto ao factor distância/tempo percorrido a partir da localização dos equipamentos de socorro, destacam-se as áreas limítrofes do concelho, nomeadamente, as Freguesias de Várzea da Serra, Salzedas e Vila Chã da Beira. Estas áreas quando reclassificadas, pelo elevado tempo que demora até serem alcançadas, adquirem valores elevados. Contudo, as áreas inacessíveis ou condicionadas à livre circulação são as que registam os valores mais elevados.

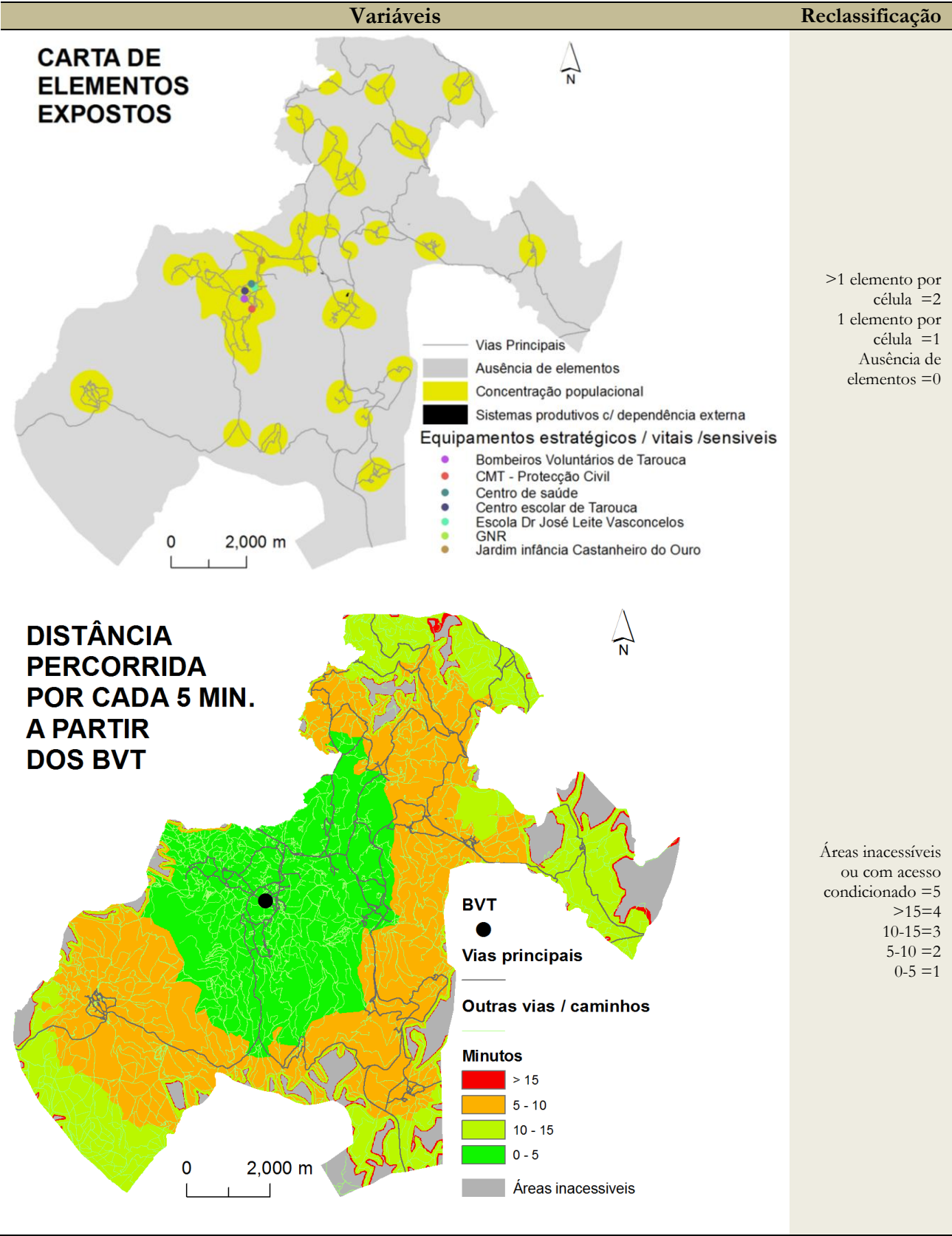


Figura 5.1. Variáveis utilizadas no modelo de localização do Risco.

A elaboração do mapa com a diferenciação espacial do risco (em sentido lato) resultou do somatório das ponderações das variáveis referentes à susceptibilidade, elementos expostos e distância percorrida a partir de um equipamento operacional (peso no output do mapa final de 45%, 45% e 10%, respectivamente).

Considerando a área de cada classe de risco no Concelho de Tarouca (Quadro 5.1), a Freguesia de Várzea da Serra destaca-se na classe de risco muito reduzido ou nulo, compreendendo esta 10,80% da área total do concelho; já na classe de risco reduzido, a Freguesia de Tarouca sobressai com 13,53% da área total; enquanto nas classes de risco moderado e elevado, destaca-se a Freguesia de São João de Tarouca (2,65 e 0,18% da área total, respectivamente).

Quadro 5.1. Percentagem de área por cada classe de Risco nas freguesias do Concelho de Tarouca.

Freguesias	Classe de Risco			
	Muito reduzido ou nulo	Reduzido	Moderado	Elevado
Dalvares	0,93	1,75	0,11	0,00
Gouviães	1,28	1,80	0,42	0,04
Granja Nova	2,86	1,85	0,41	0,01
Mondim da Beira	2,84	3,44	0,78	0,02
Salzedas	4,46	3,37	0,93	0,06
São João de Tarouca	6,32	9,42	2,65	0,18
Tarouca	4,73	13,53	0,81	0,04
Ucanha	2,57	2,31	0,47	0,04
Várzea da Serra	10,80	9,91	0,45	0,00
Vila Chã da Beira	4,81	3,05	0,53	0,01
<b>ÁREA TOTAL</b>	<b>41,60</b>	<b>50,43</b>	<b>7,57</b>	<b>0,40</b>

A Figura 5.2 representa os resultados obtidos, destacando-se as áreas com risco mais elevado na localidade de Vilarinho (Freguesia de São João de Tarouca) e nas vertentes do sector jusante do Vale do Varosa, que representam, no total, 0,4% da área do Município. Nestas áreas, a susceptibilidade a movimentos de vertente é elevada e há presença de vários elementos em risco, o que justifica o risco elevado. As áreas classificadas como risco moderado compreendem 7,57% da área total, verificando-se a sua distribuição, essencialmente, em áreas com ocupação antrópica e inacessíveis ou condicionadas por via rodoviária. Já as áreas de risco reduzido representam 50,43% da área total e correspondem a áreas com reduzida susceptibilidade. Quanto às áreas de risco muito reduzido ou nulo,

estas correspondem a 41,60% da área total e têm forte coincidência com as de susceptibilidade muito reduzida a movimentos de vertente.

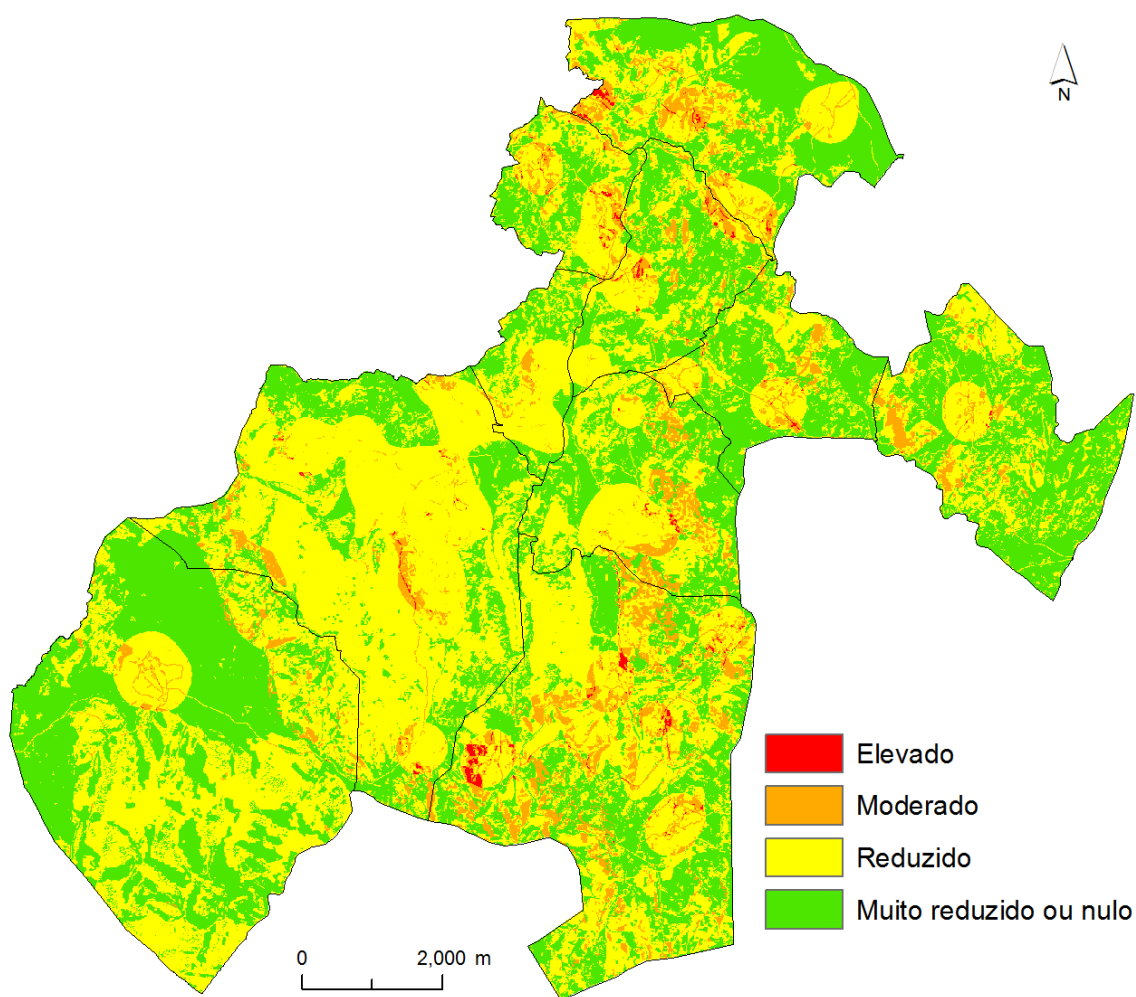


Figura 5.2. Risco de movimentos de vertente no Concelho de Tarouca.

## 5. 2. ELEMENTOS EXPOSTOS E O RISCO DO TERRITÓRIO A MOVIMENTOS DE VERTENTE

Estando o território diferenciado por classes de risco a movimentos de vertente, pretende-se apurar quais os elementos expostos que intersectam cada classe na área de estudo. Para esta abordagem, cruzou-se a informação relativa à localização dos elementos expostos com a Carta de Risco qualitativo. Nesta operação toda a informação foi convertida em raster, de forma a permitir o cruzamento entre os vários temas e aferir a percentagem de área intersectada dos elementos expostos pelas diferentes classes do risco.

A classe correspondente ao risco moderado compreende a maioria dos elementos expostos, com destaque para a totalidade dos equipamentos estratégicos e sistemas produtivos (Quadro 5.2). Relativamente às áreas ocupadas pelo tema “Concentração populacional”, grande parte é abrangida também pela classe de risco moderado (97,71% do total) e a restante, pela classe de risco elevado.

Quadro 5.2. Elementos expostos por classe de Risco.

Tipo de elemento	Designação	% de área por classe de Risco		
		Reduzido	Moderado	Elevado
<b>Concentração populacional</b>	--	0	97,71	2,29
<b>Vias principais</b>	--	9,15	85,33	5,52
<b>Equipamentos estratégicos</b>	Centro escolar de Tarouca	0	100	0
	Jardim infância	0	100	0
	GNR	0	100	0
	BVT	0	100	0
	CMT - PC	0	100	0
	Escola EB 2,3/S Dr. José	0	100	0
	Leite de Vasconcelos	0	100	0
	Centro de saúde	0	100	0
<b>Sistemas produtivos</b>	--	0	100	0

As vias rodoviárias são o único tema que intersecta as três classes de risco, destacando-se, no entanto, mais uma vez, a classe de risco moderado (85,33%). Os 5,52% de área inseridos na classe de risco mais elevado reflectem a exposição elevada de algumas destas infra-estruturas, pela sua localização em áreas classificadas com susceptibilidade moderada a elevada a movimentos de vertente.

### 5. 3. CONSEQUÊNCIAS OPERACIONAIS DERIVADAS DA PERDA DE INFRA-ESTRUTURAS ESTRATÉGICAS

De todos os elementos expostos, as áreas de susceptibilidade a movimentos de vertente mais elevada intersectam, fundamentalmente, vias rodoviárias. Estas infra-estruturas são consideradas estratégicas no Concelho de Tarouca, não só pela sua importância na mobilidade da população local, mas também pelo papel que têm no desenvolvimento económico-social desta área, ao ligarem itinerários principais e complementares com os

principais sistemas produtivos e centros de decisão municipal. As vias também são fundamentais na ligação de povoações a áreas agrícolas e/ou florestais (sectores relevantes no desenvolvimento deste concelho), sendo a sua perda ou interrupção um condicionalismo na livre circulação e acesso de máquinas agrícolas e outras viaturas a estes locais, o que se poderá reflectir na redução da produção ou, simplesmente, causar prejuízos e custos directos e indirectos. Tarouca beneficia de algumas receitas geradas pelo turismo, principalmente turismo rural, sendo as interrupções das acessibilidades um condicionalismo com influência na procura/acesso destes locais.

As infra-estruturas viárias têm maior relevo quando envolvem actividades de emergência, como referido anteriormente, sendo a sua interrupção um factor condicionante na movimentação dos meios envolvidos, o que poderá agravar determinado evento (e. g. movimentos de vertente, incêndio), pondo em causa a resposta eficaz dos meios de emergência.

Face a estas premissas, utilizou-se a informação das áreas susceptíveis a movimentos de vertente geradas anteriormente para a determinação dos locais onde as infra-estruturas viárias poderão vir a ser afectadas e, em função destes condicionalismos, determinaram percursos óptimos alternativos. Esta determinação pressupõe a interrupção efectiva das vias nas áreas de maior susceptibilidade.

Sendo abordado o risco a movimentos de vertente nesta dissertação, considerou-se na determinação destes percursos óptimos, um eventual cenário de emergência nas áreas classificadas com risco mais elevado e, em função deste, determinou-se uma rota de emergência alternativa admitindo a possibilidade de ocorrer um movimento de vertente que destrói ou interrompe uma via principal. Assim, na metodologia adoptada, considerou-se que esta rota deveria iniciar onde se localizam os equipamentos dos meios de reacção, ou seja, BVT e GNR (ponto A no mapa 1 da Figura 5.3) e como destino, uma área de risco elevado, seleccionando-se neste caso a localidade de Vilarinho (ponto B).

Na execução do modelo representado na Figura 3.10 (operações representadas no Anexo 4), intersectaram-se as vias rodoviárias com as áreas de elevada susceptibilidade a movimentos de vertente, resultando desta operação a criação de uma *feature* apenas com vias com potencial para serem interrompidas, como é o caso da E.N. 530 em dois locais relativamente próximos numa vertente da Serra de Santa Helena (Fig. 5.3). A interrupção desta via origina a perda de toda a sua funcionalidade, obrigando a circulação do tráfego entre Tarouca e as localidades a S por vias alternativas, neste caso pela E.N. 329.



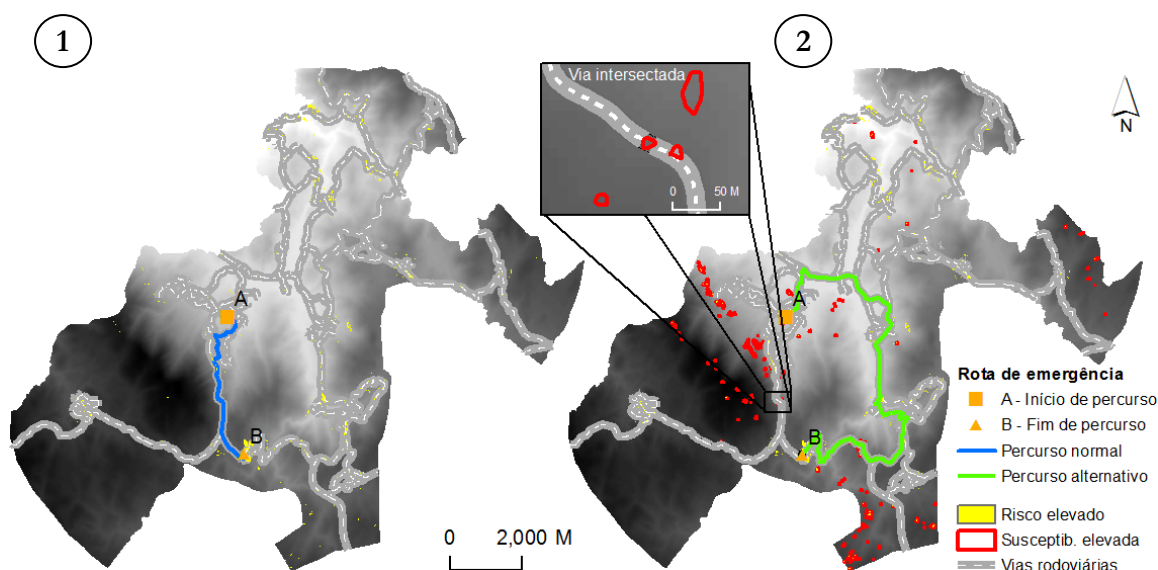


Figura 5.3. Rotas de emergência entre um equipamento de socorro (BVT) e uma área de risco elevado (Vilarinho). 1 – percurso normal entre os Pontos A e B; 2 – percurso alternativo em caso de interrupção da estrada principal por um movimento de vertente.

O mapa 1 da Figura 5.3 representa-se um percurso óptimo entre os pontos A e B (distância mais curta), sem considerar possíveis interrupções das vias rodoviárias nas áreas de maior susceptibilidade. Este percurso tem um comprimento de 5,22km e demora cerca de 6,3 minutos a ser percorrido, admitindo a velocidade média de 50km/h, sem considerar condicionantes físicas (e.g. declives), sinalização rodoviária ou densidade do tráfego. Considerando a intersecção destas vias nas áreas de elevada susceptibilidade (mapa 2 da Figura 5.3), identificam-se locais prováveis de interrupção por instabilidade nas vertentes, pelo que o percurso óptimo altera-se e aumenta para 14,99km. Admitindo a mesma velocidade média referida anteriormente, este percurso demora cerca de 18 minutos a ser efectuado (i.e., mais 11,7 minutos relativamente ao percurso habitual).

Com esta análise verifica-se que as consequências derivadas da perda de funcionalidade destas infra-estruturas rodoviárias reflectem-se, sobretudo, no aumento do factor distância e tempo percorrido entre dois pontos. Aumentando a distância percorrida, aumenta, em paralelo, o custo de cada viagem. Quanto ao tempo necessário para o percorrer, o aumento verificado pode reflectir-se no agravamento da situação de risco instalada, pela limitação na intervenção rápida dos meios de emergência.



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A distribuição da susceptibilidade na área de estudo apresenta grande variação espacial nos três tipos de movimentos de vertente analisados, devendo-se esta aos distintos condicionalismos derivados dos factores de predisposição.

De todos os modelos preditivos utilizados na modelação da susceptibilidade, os resultados obtidos a partir do Valor Informativo mostraram-se mais robustos, por comparação com os operadores Sum e Gamma da Lógica *Fuzzy*. Porém, face ao reduzido número de movimentos de vertente que constituem o inventário de movimentos de vertente construído para o Concelho, verifica-se que estes modelos perdem consistência quando se produz a partição aleatória dos movimentos, pelo que é preferível a modelação com a totalidade dos casos de cada tipo específico de movimento, apesar da menor robustez que caracteriza as taxas de sucesso por comparação com as taxas de predição.

Nos três tipos de movimentos de vertente considerados, as variáveis independentes têm diferentes pesos na ocorrência dos mesmos, evidenciando-se nos deslizamentos rotacionais o “Solo”, nos translacionais a “Geologia” e nas escoadas a “Exposição das vertentes”. Na secção 4.5, faz-se referência a estas variáveis como as mais importantes na modelação da susceptibilidade a movimentos de vertente, responde-se assim à questão n.º 1 identificada na Introdução.

Nas áreas xistentas há forte probabilidade de ocorrerem deslizamentos rotacionais, enquanto os deslizamentos translacionais ocorrem com mais frequência nas vertentes do Vale do Varosa. A Serra de Santa Helena destaca-se pela susceptibilidade elevada à ocorrência de escoadas, nomeadamente as vertentes com forte declive e coberto vegetal degradado, voltadas para a cidade de Tarouca.

No que respeita à distribuição da susceptibilidade do conjunto dos movimentos de vertente (deslizamentos rotacionais, translacionais e escoadas) na área de estudo destacam-se com os valores mais elevados as vertentes da Serra de Santa Helena, vertentes do Vale do Varosa a N da Freguesia de São João de Tarouca e as vertentes do Monte Raso, considerando-se estas áreas prioritárias na adopção de medidas preventivas por apresentarem maior probabilidade de ocorrência dos próximos movimentos. Com a identificação das áreas mais susceptíveis a movimentos de vertente (secção 4.4) responde-se à questão de partida n.º 2.

Relativamente ao risco, as áreas classificadas com risco moderado sobressaem das restantes pela percentagem de área abrangida. No entanto, as vertentes que integram a classe de risco mais elevado, pese embora possuam uma área relativamente pequena, devem ser alvo de maior preocupação, por haver elevado índice de susceptibilidade à ocorrência de movimentos (determinado pela presença factores de predisposição) e elementos expostos sobre as mesmas.

Dos elementos expostos na área de estudo, evidencia-se a elevada concentração de equipamentos estratégicos/vitais/sensíveis (CMT, BVT, centro escolar e os equipamentos de saúde) e de população na Freguesia de Tarouca. Adicionalmente, verifica-se a presença de várias vias principais (estratégicas) que ligam os equipamentos mencionados às restantes áreas do concelho. Porém, há uma distribuição espacial de pequenos aglomerados populacionais dispersos por toda a área em análise, evidenciando-se as áreas periféricas, pelo agravamento do risco devido à distância a que se situam dos equipamentos de socorro/emergência. Com a identificação dos elementos em risco e da sua localização na área de estudo (secções 5.1 e 5.2) responde-se à questão de partida n.º 3.

As áreas com índice de risco mais elevado destacam-se na Freguesia de São João de Tarouca e no sector jusante do Vale do Varosa, em função do índice de susceptibilidade a movimentos de vertente, concentração de elementos expostos e distância acentuada aos equipamentos operacionais. Quanto ao risco moderado, este compreende uma vasta área, destacando-se a Freguesia de Tarouca pela área abrangida por esta classe de risco. Com o reconhecimento das áreas com o índice de risco mais elevado (secção 5.1) responde-se à pergunta n.º 4.

Os condicionalismos operacionais derivados da perda da funcionalidade de infra-estruturas estratégicas reflectem-se sobretudo na redução da eficácia dos meios operacionais, ao aumentar o tempo de reacção num eventual cenário de emergência. Face à importância atribuída às infra-estruturas rodoviárias, a determinação dos locais com maior probabilidade de interrupção pela ocorrência de movimentos foi feita com base no cruzamento do traçado das vias com a susceptibilidade. Para o caso analisado nesta dissertação, em função da perda ou interrupção de uma via principal que liga os equipamentos de socorro/emergência às áreas com risco mais elevado, resultam vários condicionalismos, como o aumento da distância percorrida e do tempo de deslocação, podendo aumentar, também, os custos associados. Ao identificar-se as consequências operacionais derivadas da perda da funcionalidade de infra-estruturas estratégicas devido à ocorrência de movimentos de vertente (secção 5.3) responde-se à questão inicial n.º 5.

No final deste trabalho justifica-se fazer referência a alguns temas adicionais de investigação que se poderiam ter sido desenvolvidos, com mais tempo e mais dados disponíveis, para enriquecer o estudo desenvolvido.

Dada a falta de informação aos movimentos de vertente na área de estudo, nomeadamente a data da sua ocorrência, não foi possível desenvolver o tema do desencadeamento dos vários movimentos inventariados. Havendo uma forte presunção de que a precipitação é o principal factor desencadeante, teria sido interessante determinar quais os limiares de intensidade / duração da precipitação que estão associados ao desencadeamento dos diferentes tipos de movimentos de vertente na área estudada. Adicionalmente, esta informação poderia permitir fazer evoluir a cartografia de susceptibilidade efectuada para uma cartografia de perigosidade, agregada a cenários de precipitação desencadeante.

Noutro sentido, a avaliação da vulnerabilidade no Concelho de Tarouca poderia ter ser mais completa, acção condicionada devido à falta de dados referentes ao grau de perda dos elementos em risco, no caso de serem afectados pela ocorrência de uma eventual manifestação de instabilidade de determinada magnitude. O aprofundamento futuro da avaliação da vulnerabilidade, na relação com a magnitude dos movimentos de vertente (dimensão e velocidade de deslocação), permitirá o incremento da qualidade da análise do risco e a obtenção de dados mais precisos e rigorosos.



## BIBLIOGRAFIA

- AN, P., MOON, W. & RENCZ, A. (1991) - Application of fuzzy set theory for integration of geological, geophysical, and remote sensing data. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, Ed. 27: 1-11.
- ARDIZZONE, F.; CARDINALI, M.; CARRARA, A.; GUZZETTI, F. & REICHENBACH, P. (2002) - Impact of Mapping Errors on the Reliability of Landslide Hazard Maps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, N.º 2, European Geophysical Society, Italy: 3-14.
- ARDIZZONE, F.; CARDINALI, M.; GALLI, M.; GUZZETTI, F. & REICHENBACH, P. (2007) - Identification and Mapping of Recent Rainfall-Induced Landslides Using Elevation Data Collected by Airborne Lidar. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, N.º 7, Italy: 637-650.
- BANKOFF, G; FRERKS, G. & HILHORST, D. (2004) - *Mapping Vulnerability, Disasters, Development, and People*. Earthscan, London.
- BATEIRA, C. & ABREU, J. (2003) – Os problemas da cartografia dos riscos naturais. Contributos para a definição da susceptibilidade geomorfológica a partir da observação de vários movimentos de vertente ocorridos no Norte de Portugal. In *Territorium*, Coimbra, 10: 69-88.
- BATEIRA, C. (2001) – *Movimentos de Vertente no NW de Portugal, Susceptibilidade Geomorfológica e Sistemas de Informação Geográfica*. Dissertação de Doutoramento em Geografia Física, apresentada à Universidade do Porto, Porto.
- BELL, R. & GLADE, T. (2004) - Multi-hazard analyses in natural risk assessments. In: BREBBIA, C.(Hrsg.): *International Conference on Computer Simulation Risk Analyses and Hazard Mitigation*, Rhodes (GR): 197-206.
- BIROT, P. (1975) – *Portugal*. Livros horizonte, Lisboa.
- BLAHUT, J.; WESTEN, C. & STERLACCHINI, S. (2010) - Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas. *Geomorphology*, Vol. 119, Ed. 1-2: 36 – 51.
- BLAIKIE, P., CANNON, T., DAVIS, T., & WISNER, B. (1994) - *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability, and Disasters*. Routledge, London.
- BONHAM-CARTER, G. (1996) - Geographic Information Systems for Geoscientists, Modeling with GIS. *Pergamon Press*, Oxford.
- BRABB, E. (1984) - *Innovative approaches to landslide hazard mapping*. Proceedings of Fourth International Symposium on Landslides, Toronto: 307–324.
- BRUNETTI, M.; GUZZETTI, F. & ROSSI, M. (2009) - Probability Distributions of Landslide Volumes. *Nonlinear Processes in Geophysics*, Vol. 16, Italy: 179-188.
- CARRARA, A. (1993) – *Uncertainty in Evaluating Landslide Hazard and Risk*. National Research Council – CIOC, Italy: 101-107.
- CARRARA, A.; CARDINALI, M. & GUZZETTI, F. (1992) – Uncertainty in Assessing Landslide Hazard and Risk. *ITC Journal*: 172-183.

- CARRARA, A.; CROSTA, G. & FRATTINI, P. (2003) – Geomorphological and Historical Data in Assessing Landslide Hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 28: 1125-1142.
- CARRASCO, R.; PEDRAZA, J.; MARTIN-DUQUE, J.; MATTERA, M.; SANZ, M. & BODOQUE, J. (2003) - Hazard Zoning for Landslides Connected to Torrential Floods in the Jerte Valley (Spain) by Using GIS Techniques. *Natural hazards*, Vol. 30: 361-381.
- CHUNG, C. & FABBRI, A. (1999) - Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 65, Ed.12: 1389–1399.
- CLERICI, A.; PEREGO, S.; TELLINI, C. & VESCOVI, P. (2002) - A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. *Geomorphology*, Vol. 48, Ed. 4: 349-364
- COOKE, R. e DOORNKAMP, J. (1974) – *Geomorphology in Environmental Management – an introduction*. Clarendon Press (Second edition, 1990); Oxford.
- COOPER, R. (2007) - *Mass Movements in Great Britain*. Geological Conservation Review Series, Joint Nature Conservation Committee, N.º 33, Peterborough: 70-348.
- CROZIER, M. & GLADE, T. (2005) - Landslide hazard and risk: issues, concepts and approach. In: GLADE, T., ANDERSON, M., CROZIER, M. (Eds.), *Landslide Hazard and Risk*. Wiley, Chichester: 1–40.
- CRUDEN, D. & VARNES, D. (1996) - Landslide types and processes. *Special report 247: Landslides: Investigation and Mitigation* (Eds: TURNER, A. & SCHUSTER, R.), Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington, D. C.: 36-75.
- DAI, F.; LEE, C. & NGAI, Y. (2001) - Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, Vol. 64: 65–87.
- DAVEAU, S. & COLABORADORES (1985) - *Mapas Climáticos de Portugal. Nevoeiro e Nebulosidade. Contrastes Térmicos*. Centro de Estudos Geográficos, Memória N.º 7, Lisboa.
- DGOTDU (2010) - *Elaboração do Nível Estratégico da REN. Propostas de orientações estratégicas de âmbito nacional para as tipologias de áreas Integradas em REN*. Consultadoria no âmbito da elaboração do nível estratégico da REN – Litoral e Instabilidade de Vertentes; Relatório Final. Fundação da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- DIKAU, R.; BRUNSDEN, D.; SCHROTT, L. & IBSEN, M-L. (1996) - *Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes*. John Wiley & Sons, Chichester.
- DIKAU, R.; CAVALLIN, A. & JÄGER, S. (1996) – Databases and GIS for Landslide Research in Europe. *Geomorphology*, Vol. 15: 227-239.
- EASTMAN, J. (2006) - Guide to GIS and Image Processing. *IDRISI Andes*, Manual version 15.00, Clark University, Worcester, USA: 275-280.
- EECKHAUT, M.; REICHENBACH, P.; GUZZETTI, F.; ROSSI, M. & POESEN, J. (2009) - Combined Landslide Inventory and Susceptibility Assessment Based on Different Mapping Units: An Example from the Flemish Ardennes, Belgium. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 9: 507-521.
- ELDREDGE, S.; HARTY, K. e GIRAUD, R. (2008) - Landslides. *Utah Natural Hazards Handbook*; Utah: 16-23.



- EUROPEAN COMMISSION (2003) – *Lessons Learnt from Landslide Disasters in Europe*. Nadies Project, Report 20558 EN, Italy. [Acedido em 07 de Janeiro de 2011]. [http://ocha.unog.ch/drptoolkit/HazardInfo&MonitoringTools/Land&Mudslides/Landslides\\_Final.pdf](http://ocha.unog.ch/drptoolkit/HazardInfo&MonitoringTools/Land&Mudslides/Landslides_Final.pdf)
- FAVAS, P. (2008) - *Biogeoquímica em Áreas Mineiras Estano-volframíticas*. Dissertação de Doutoramento apresentada à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real: 9-72.
- FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; CASCINI, L.; LEROI, E. & SAVAGE, W. on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes (2008) - Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, Vol. 102, Ed. 3-4: 85-98.
- FERNÁNDEZ, T.; IRIGARAY, C.; HAMDOUNI, R. & CHACÓN, J. (2003) - Methodology for Landslide Susceptibility Mapping by Means of a GIS. Application to the Contraviesa Area (Granada, Spain). *Natural Hazards*, N.º 30: 297–308.
- FERREIRA, A. & FERREIRA, D. (2004) – Aspectos Gerais. *O Relevo de Portugal. Grandes Unidades Regionais*, Cap. 1, Associação Portuguesa de Geomorfólogos, Coimbra: 9-19.
- FERREIRA, A. (1978) – *Planaltos e montanhas do Norte da Beira. Estudos de Geomorfologia*. Memórias do Centro de Estudos Geográficos, N.º 4, Lisboa: 372-378.
- FERREIRA, A. (2000) - *Dados Geoquímicos de Base de Sedimentos Fluviais de Amostragem de Baixa Densidade de Portugal Continental: Estudo de Factores de Variação Regional*. Dissertação de doutoramento em Geociências apresentada à Universidade de Aveiro. Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro.
- FERREIRA, A. (2005) – Movimentos de vertente. *Geografia de Portugal 1, O Ambiente Físico*; Circulo de Leitores, Rio de Mouro: 198-208.
- FERREIRA, N. & SOUSA, M. (1994) – *Notícia Explicativa da Folha 14-B – Moimenta da Beira*. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa.
- FERRIS, E. (2009) - *Protection in Natural Disasters*. Paper submitted to Protecting people in conflict and crisis: Responding to the challenges of a changing world; University of Oxford: 3-11. [Acedido em 21 de Outubro de 2010]. [http://www.brookings.edu/~media/Files/rc/papers/2009/0922\\_natural\\_disasters\\_ferris/0922\\_natural\\_disasters\\_ferris.pdf](http://www.brookings.edu/~media/Files/rc/papers/2009/0922_natural_disasters_ferris/0922_natural_disasters_ferris.pdf)
- GARCIA, R. & ZÉZERE, J.(2003) - Avaliação de Riscos Geomorfológicos: Conceitos, Terminologia e Métodos de Análise. *III Seminário Recursos Geológicos, Ambiente e Ordenamento do Território*, Livro de Actas, Vila Real: 299-308.
- GLADE, T. & CROZIER, M. (2005) - A review of scale dependency in landslide hazard and risk analysis. GLADE, T., ANDERSON, M. & CROZIER, M. (Eds): *Landslide hazard and risk*. Wiley, Chichester: 75-138.
- GLADE, T. & CROZIER, M. (2005a) - Landslide hazard and risk - Concluding comment and perspectives. GLADE, T., ANDERSON, M. & CROZIER, M. (Eds): *Landslide hazard and risk*. Wiley, Chichester: 767-774.
- GORGE, M. (2006) - Crisis management best practice – where do we start from? *Computer Fraud & Security*, Vol. 2006, Ed. 6: 10-13.

- GUZZETTI, F. (2005) – *Landslide hazard and Risk Assessment*. Dissertation zur erlangung des doktorgrads (Dr. Rer. Nat.) der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Italy.
- GUZZETTI, F.; CARRARA, A.; CARDINALI, M. & REICHENBACH, P. (1999) - Landslide Hazard Evaluation: a Review of Current Techniques and Their Application in a Multi-Scale Study, Central Italy. *Geomorphology*, N.º 31: 181-216.
- GUZZETTI, F.; REICHENBACH, P.; ARDIZZONE, F.; CARDINALI, M. & GALLI, M. (2006) - Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, Vol. 81, Ed.1-2: 166-184.
- GUZZETTI, F.; REICHENBACH, P.; CARDINALI, M.; ARDIZZONE, F. & GALLI, M. (2003) - The Impact of Landslides in the Umbria Region, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 3, European Geosciences Union, Italy: 469-486.
- HIGHLAND, L. & BOBROWSKY, P. (2008). *The Landslide Handbook - A Guide to Understanding Landslides*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, Circular 1325.
- HOFFMANN, B. (2002) - *Disaster Risk Management*. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH; Eschborn: 16-19. [Acedido em 21 de Outubro de 2010]. <http://www2.gtz.de/dokumente/bib/02-5001.pdf>
- HUABIN, W.; GANGJUN, L.; WEIYA, X. & GONGHUI, W. (2005) - GIS-based Landslide Hazard Assessment: an Overview. *Progress in Physical Geography*, Vol. 4; Ed. 29: 548–567.
- HUFSCHMIDT, G., CROZIER, M. & GLADE, T. (2005) - Evolution of natural risk: research framework and perspectives. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5: 375-387.
- HUTCHINSON, J. (1988) - General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. *Proceedings, Fifth International Symposium on Landslides* (Ed. BONNARD, C.), Vol. 1, Rotterdam: 3-35.
- JULIÃO, P.; NERY, F.; RIBEIRO, J.; BRANCO, M. & ZÊZERE, J. (2009) – *Guia Metodológico para a Criação de Cartografia Municipal de Risco e para a Criação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) de Base Municipal*. Autoridade Nacional de Protecção Civil: 20-65.
- KUWATA, Y. & TAKADA, S. (2004) - Effective emergency transportation for saving human lives. *Natural Hazards*, Vol. 33, Ed. 1: 23–46.
- LANG, A.; MOYA, J.; COROMINAS, J.; SCHROTT, L. & DIKAU, R. (1999) - Classic and New Dating Methods for Assessing the Temporal Occurrence of Mass Movements. *Geomorphology*, Vol. 30: 33-52.
- LIU, H. & WU, T. (2003) - Estimating the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve for repeated measures design. *Journal of Statistical Software*, 12: 1-18.
- LIU, H.; LI, G.; CUMBERLAND, W. & WU, T. (2005) - Testing Statistical Significance of the Area under a Receiving Operating Characteristics Curve for Repeated Measures Design with Bootstrapping. *Journal of Data Science*, 3: 257-278.
- LOPES, P. (2008) – *Avaliação da Susceptibilidade a deslizamentos no concelho de Santarém*. Dissertação de mestrado apresentada Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- LOTZE, F. (1945) – Zur Geologie der Iberischen Meseta I. *Geotektonische Fortsch*, N.º 6: 92.

- MATOS, L. (2008) – *Estabilidade de Taludes em Rochas Silto-Argilosas – Técnicas de Remediação para Roturas Superficiais*. Dissertação de Mestrado em Geologia apresentada Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa.
- MELO, R.; ZÊZERE, J.; OLIVEIRA, S.; PIEDADE, A. & HENRIQUES, C. (2010) – Avaliação e validação temporal da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos rotacionais e translacionais superficiais (área-amostra de Calhandriz). In: Bateira, C.; Soares, L.; Gomes, A.; Chaminé, H. (Eds.) *Volume de Actas/Proceedings do V Congresso Nacional de Geomorfologia*. Porto: 321 - 326.
- NETTLETON, I.; MARTIN, S.; HENCHER, S. & MOORE, R. (2005) - Debris flow types and mechanisms. *Scottish Road Network Landslides Study* (Eds: WINTER, M.; MACGREGOR, F. & SHACKMAN, L.). Trunk Roads: Network Management Division Published Report Series. Edinburgh: The Scottish Executive: 45-67.
- PEDROSA, A.; MARTINS, M. & PEDROSA, F. (2004) – *Processos de erosão acelerada. Região Demarcada do Douro: um património em risco*. Estudos & Documentos, Douro 17: 207-232.
- PEREIRA, S. (2009) – *Perigosidade a Movimentos de Vertente na Região Norte de Portugal*. Dissertação de Doutoramento em Geografia Física apresentada à Faculdade de Letras da Universidade do Porto.
- PIEADADE, A.; ZÊZERE, J.; GARCIA, R.; OLIVEIRA, S. (2010) - *Avaliação e validação de modelos de susceptibilidade a deslizamentos em áreas homogêneas na região a norte de Lisboa*. 16º Congresso da APDR, Sessão 13-A, Ordenamento do Território e Risco Natural, Universidade da Madeira, Funchal: 1305-1319.
- POPESCU, M. (2002) - *Landslide Causal Factors and Landslide Remedial Options*. Keynote Lecture, Proceedings 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infra-Structures, Singapore: 61-81. [Acedido em 27 de Dezembro de 2010]. <http://www.geoengineer.org/Lanslides-Popescu.pdf>
- REBELO, F. (1977) – A Acção Humana como Causa de Desabamentos e Deslizamentos - Análise de um Caso Concreto. *Os processos erosivos actuais no litoral norte e centro de Portugal*; Estudos N.º 2; Coimbra: 2-20.
- REBELO, F. (2003) – *Riscos Naturais e Acção Antrópica. Estudos e Reflexões*. 2ª Edição Revista e Aumentada; Imprensa da universidade de Coimbra; Coimbra: 16-126.
- REBELO, F. (2010) – *Geografia Física e Riscos Naturais*. Imprensa da universidade de Coimbra, Coimbra: 57-80.
- REIS, E.; ZÊZERE, J.; VIEIRA, G. & RODRIGUES, M. (2003) – Integração de Dados Espaciais em SIG para Avaliação da Susceptibilidade à Ocorrência de Deslizamentos. *Finisterra*, Vol. XXXVIII, N.º 76: 3-34.
- REMONDO, J.; GONZÁLEZ-DÍEZ, A.; TERÁN, J. & CENDRERO, A. (2003) - Landslide Susceptibility Models Utilising Spatial Data Analysis Techniques. A Case Study from the Lower Deba Valley, Guipúzcoa (Spain). *Natural hazards*, N.º 30: 267-279.
- RIBEIRO, A.; ANTUNES, M.; FERREIRA, M.; ROCHA, R.; SOARES, A.; ZBYSZEWSKI, G.; ALMEIDA, F.; CARVALHO, D. & MONTEIRO, J. (1979) – *Introduction à la Géologie du Portugal*. Serviços Geológicos de Portugal da Direcção-Geral de Geologia e Minas, Lisboa.
- RIBEIRO, O. (1940) – Problemas Morfológicos do Maciço Hispérico Português. *Las Ciencias*, Vol. VI: 315-336.

- RIBEIRO, O. (1955) – *Geografia de Espanha y Portugal*. Tomo V, Portugal, Barcelona.
- ROTARU, A.; OAJDEA, D. & RĂILEANU, P. (2007) - Analysis of the Landslide Movements. *International Journal of Geology*, Ed. 3; Vol. 1: 70-79.
- SANTACANA, N.; BAEZA, B.; COROMINAS, J.; PAZ, A. & MARTURIÁ, J. (2003) - A GIS-Based Multivariate Statistical Analysis for Shallow Landslide Susceptibility Mapping in La Pobla de Lillet Area (Eastern Pyrenees, Spain). *Natural Hazards*, Ed. 30: 281–295.
- SHEU, J. (2007) - An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 43, Ed. 6: 687-709.
- TAKÁES, M.; KATALIN, L. & SZAKÁL, A. (2000) – Information aggregation in FLC using evolutionary operators. *IFAC Symposium on Artificial Intelligence (AIRTIC2000)*, Budapest, Hungary: 269-273.
- TANGESTANI, M. (2009) - A comparative study of Dempster–Shafer and fuzzy models for landslide susceptibility mapping using a GIS: An experience from Zagros Mountains, SW Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 35, Ed.1: 66-73.
- TEIXEIRA, C.; MEDEIROS, A. & FERNANDES, A. (1969) – *Notícia Explicativa da Folha 14-A – Lamego* (Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000). Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- THIERY, Y.; MALET, J.; STERLACCHINI, S.; PUISSANT, A. & MAQUAIRE, O. (2007) - Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: Application to a complex mountainous environment. *Geomorphology*, Vol. 48, Ed. 4: 349-364.
- UNDRO (1979) - *Natural Disasters and Vulnerability Analysis*. Report of Expert Group Meeting 9-12 July 1979, Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator, Geneva.
- VAN DEN EECKHAUT, M.; REICHENBACH, F.; GUZZETTI, P.; ROSSI, M. & POESEN, J. (2009) - Combined landslide inventory and susceptibility assessment based on different mapping units: an example from the Flemish Ardennes, Belgium. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 9: 507–521.
- VARNES, D. (1978) – Slope Movement Types and Processes. In: SCHUSTER, R. & KRIZEK, R. (eds.), *Landslides-Analysis and Control: Transportation Research Board, Special Report N.º 176*. Chapter 2, Washington DC: 11-28.
- VARNES, D. (1984) – *Landslide Hazard Zonation: a Review of Principles and Practice*. UNESCO, Paris.
- WP/WLI (1993) – *Multilingual Landslide Glossary*. International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party for World Landslide Inventory; The Canadian Geotechnical Society, Canada. [Acedido em 19 de Outubro de 2010]. <http://www.cgs.ca/cgsdocuments/Heritage%20Archives/powerpointpresentations/090524-multilingual-landslide-glossary.pdf>.
- YALCIN, A.; REIS, S.; AYDINOGLU, A. & YOMRALIOGLU, T. (2011) - A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena*, Vol. 85: 274-287.

- YIN, K. & YAN, T. (1988) - Statistical Prediction Model for Slope Instability of Metamorphosed Rocks. In: Bonnard, C. (Ed.), *Proc. Fifth International Symposium in Landslides*, Lausanne. A.A. Balkema, Rotterdam, Holanda, vol.2: 1269-1272.
- YUAN, Y. & WANG, D. (2009) - Path selection model and algorithm for emergency logistics management. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 56, Ed. 3: 1081-1094.
- ZADEH, L. A. (1965) – Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8: 338-353.
- ZÊZERE, J. (1988) – *As Costeiras a Norte de Lisboa. Dinâmica de vertentes e Cartografia Geomorfológica*. Dissertação de Mestrado em Geografia Física e Regional apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- ZÊZERE, J. (1997) – *Movimentos de Vertente e Perigosidade Geomorfológica na Região a Norte de Lisboa*. Dissertação de Doutoramento apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- ZÊZERE, J. (2000) – A Classificação dos Movimentos de Vertente Tipologia, Actividade e Morfologia. *Apontamentos de Geografia – Série de Investigação*: N.º6. Centro de Estudos Geográficos, Lisboa.
- ZÊZERE, J. (2001) - *A avaliação da perigosidade geomorfológica. Aplicação do método do valor informativo na área-amostra de Calhandriz*. Moreira, M.E.; Moura, A.C.; Granja, M.H.; Noronha, F. (eds.), Homenagem (in honorum) Professor Gaspar Soares de Carvalho. Braga: 347-361.
- ZÊZERE, J. (2001a) - *Distribuição e ritmo dos movimentos de vertente na Região a Norte de Lisboa*. Centro de Estudos Geográficos, Área de Geografia Física e Ambiente, Relatório n.º 38, Lisboa: 167. [Acedido em 15 de Novembro de 2010]. [http://www.riskam.org/images/pdf/livcapnac\\_2010\\_distribuicao\\_vertentes\\_regiao\\_norte\\_lisboa.pdf](http://www.riskam.org/images/pdf/livcapnac_2010_distribuicao_vertentes_regiao_norte_lisboa.pdf)
- ZÊZERE, J. (2005) – *Dinâmica de vertentes e risco geomorfológico*. Centro de Estudos Geográficos, Relatório N.º41, Lisboa.
- ZÊZERE, J. (2007) - Predição Probabilística de Movimentos de Vertente na Escala Regional. *Actes de les Jornades sobre Terrasses i Prevenció de Riscos Naturals*, Department de Medi Ambient, Consell de Mallorca: 17-30.
- ZÊZERE, J. (2007a) – Riscos e Ordenamento do Território. *Inforgéo*, 20/21, Ordenamento Territorial, Associação Portuguesa de Geógrafos: 59-63.
- ZÊZERE, J.; FALEH, A.; SADIKI, A.; GARCIA, R.; & OLIVEIRA, S. (2009) – Modelação da Susceptibilidade a Deslizamentos na Bacia do Oued Sra (Rif central, Marrocos) com Métodos Estatísticos Bi-variados. *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, Vol. VI, APGEOM, Braga: 203-210.
- ZÊZERE, J.; GARCIA, R.; OLIVEIRA, S. & REIS, E. (2005) – *Análise Sensitiva na Avaliação da Susceptibilidade a Deslizamentos na Região Norte de Lisboa*. [Acedido em 15 de Outubro de 2010]. [http://www.apgeo.pt/files/docs/CD\\_X\\_Coloquio\\_Iberico\\_Geografia/pdfs/075.pdf](http://www.apgeo.pt/files/docs/CD_X_Coloquio_Iberico_Geografia/pdfs/075.pdf).
- ZÊZERE, J.; PEREIRA, A. & MORGADO, P. (2007) - *Perigos Naturais e Tecnológicos no Território de Portugal Continental*. Centro de Estudos Geográficos, Faculdade de Letras, Universidade de Lisboa. [Acedido em 15 de Outubro de 2010]. [http://www.apgeo.pt/files/docs/CD\\_X\\_Coloquio\\_Iberico\\_Geografia/pdfs/091.pdf](http://www.apgeo.pt/files/docs/CD_X_Coloquio_Iberico_Geografia/pdfs/091.pdf).

- ZÊZERE, J.; PEREIRA, A. & MORGADO, P. (2007a) – Perigos Naturais em Portugal e Ordenamento do Território. E depois do PNPOT?. In *Geophilia - O sentir e os sentidos da Geografia*, C.E.G., Lisboa: 529-542.
- ZIMMERMANN, H. & ZYSNO, P. (1980) – Latent connectives in human decision making. *Fuzzy Sets and Systems*, 4:37-51.

## OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

<http://www.cm-tarouca.pt/> - acedido em 10 de Outubro de 2010.

<http://www.emdat.be/> - acedido em 30 de Novembro de 2010.





## DOCUMENTOS CARTOGRÁFICOS

- CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL (1992). Escala de 1:500 000. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL. Escala 1:50 000. Folhas 14-A (Lamego) e 14-B (Moimenta da Beira). Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- CARTA MILITAR DE PORTUGAL (1998). Escala 1:25 000. Folha 147 (Tarouca), Edição n.º3. Instituto Geográfico do Exército, Lisboa.
- CARTA MILITAR DE PORTUGAL (1997). Escala 1:25 000. Folha 148 (Moimenta da Beira), Edição n.º3. Instituto Geográfico do Exército, Lisboa.
- CARTA MILITAR DE PORTUGAL (1998a). Escala 1:25 000. Folha 137 (Lamego), Edição n.º3. Instituto Geográfico do Exército, Lisboa.
- CARTA MILITAR DE PORTUGAL (1997a). Escala 1:25 000. Folha 138 (Armamar), Edição n.º3. Instituto Geográfico do Exército, Lisboa.
- CARTA NEOTECTÓNICA DE PORTUGAL (1989). Escala 1:1 000 000. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Exemplo de um deslizamento rotacional (adaptado de VARNES, 1978). .....	7
Figura 1.2. Deslizamento translacional na Serra de Santa Helena (vertente exposta a NE). .....	9
Figura 1.3. Representação de um desabamento (adaptado de VARNES, 1978). .....	10
Figura 1.4. Escoda numa vertente da Serra de Santa Helena. ....	12
Figura 1.5. Precipitação diária registada nas estações meteorológicas de Pendilhe, Leomil e Touro entre 1 Nov. e 15 de Dez. de 2006. ....	14
Figura 1.6. Modelo conceptual do risco natural (adaptado de ZÉZERE, 2005). ....	18
Figura 2.1. Enquadramento geográfico do Concelho de Tarouca.....	21
Figura 2.2. Mapa geológico simplificado do Concelho de Tarouca (adaptado das Folhas 14-A (Lamego) e 14-B (Moimenta da Beira), Carta Geológica de Portugal, à escala 1:50 000)..	23
Figura 2.3. Relevo da área de estudo com sobreposição da rede de drenagem do Rio Varosa. ....	26
Figura 2.4. Densidade populacional (Hab./km <sup>2</sup> ) em 2001 (baseado nos Censos de 2001 do INE). 27	
Figura 3.1. Exemplo de movimentos de vertente identificados a partir da análise dos ortofotomapas. ....	30
Figura 3.2. Deslizamento identificado a partir do traçado das curvas de nível no Monte Raso (Salzedas). ....	31
Figura 3.3. Deslizamentos identificados em trabalho de campo. ....	32
Figura 3.4. Identificação de movimentos a partir da vegetação deformada ou danificada. ....	34
Figura 3.5. Validação dos movimentos de vertente a partir das características físicas da vegetação. 35	
Figura 3.6. Parábolas resultantes da equação, para a obtenção de pontos críticos com exemplo à direita da intersecção de pontos numa determinada direcção (adaptado de EASTMAN, 2006). ....	37
Figura 3.7. Comparação entre extracto do MDT do Concelho de Tarouca elaborado sem pontos críticos (A) e extracto do MDT elaborado com pontos críticos (B). ....	37
Figura 3.8. Modelo de avaliação da susceptibilidade a movimentos de vertente, com validação por taxas de sucesso e predição. ....	42
Figura 3.9. Modelo de localização do risco. ....	44
Figura 3.10. Modelo de análise de percursos óptimos.....	47
Figura 4.1. Movimentos de vertente validados no Concelho de Tarouca. ....	50

Figura 4.2. Representação espacial das variáveis utilizadas na avaliação da susceptibilidade aos movimentos de vertente e respectiva representação da reclassificação em <i>raster</i> .	52
Figura 4.3. Percentagem da área de estudo por classe de declive.	54
Figura 4.4. Mapas de susceptibilidade a movimentos de vertente, validados por taxas de sucesso. A – deslizamentos rotacionais; B - deslizamentos translacionais; C - escoadas.	62
Figura 4.5. Curvas de sucesso para os deslizamentos rotacionais, translacionais e escoadas (método do VI).	63
Figura 4.6. Mapas de susceptibilidade a movimentos de vertente, validados por taxas de predição. A – deslizamentos rotacionais; B - deslizamentos translacionais; C - escoadas.	64
Figura 4.7. Curvas de predição para os deslizamentos rotacionais, translacionais e escoadas.	65
Figura 4.8. Mapas de susceptibilidade a movimentos de vertente, obtidos pelo operador Sum da Lógica <i>Fuzzy</i> . A – deslizamentos rotacionais; B - deslizamentos translacionais; C - escoadas.	67
Figura 4.9. Curvas de sucesso dos modelos de susceptibilidade produzidos com o operador Sum (soma algébrica) da Lógica <i>Fuzzy</i> para os deslizamentos rotacionais, translacionais e escoadas.	67
Figura 4.10. Mapas de susceptibilidade a movimentos de vertente, obtidos pelo operador Gamma da Lógica <i>Fuzzy</i> . A – deslizamentos rotacionais; B - deslizamentos translacionais; C - escoadas.	69
Figura 4.11. Curvas de sucesso dos modelos de susceptibilidade produzidos com o operador Gamma da Lógica <i>Fuzzy</i> para os deslizamentos rotacionais, translacionais e escoadas.	69
Figura 4.12. Curvas sucesso e predição dos modelos de susceptibilidade produzidos para o Concelho de Tarouca, para diferentes tipologias de movimentos de vertente. A - deslizamentos rotacionais; B - deslizamentos translacionais; C - escoadas.	70
Figura 4.13. Variação da percentagem de área por classe de susceptibilidade a deslizamentos rotacionais, considerando a hierarquia dos vários factores de predisposição derivada do índice <i>accountability</i> .	74
Figura 4.14. Variação da percentagem de área por classe de susceptibilidade a deslizamentos translacionais, considerando a hierarquia dos vários factores de predisposição derivada do índice <i>accountability</i> .	75
Figura 4.15. Variação da percentagem de área por classe de susceptibilidade a escoadas, considerando a hierarquia dos vários factores de predisposição derivada do índice <i>accountability</i> .	76
Figura 4.16. Susceptibilidade do território do Concelho de Tarouca a movimentos de vertente.	78
Figura 5.1. Variáveis utilizadas no modelo de localização do Risco.	82
Figura 5.2. Risco de movimentos de vertente no Concelho de Tarouca.	84

Figura 5.3. Rotas de emergência entre um equipamento de socorro (BVT) e uma área de risco elevado (Vilarinho). 1 – percurso normal entre os Pontos A e B; 2 – percurso alternativo em caso de interrupção da estrada principal por um movimento de vertente.....	87
--	----



## ÍNDICE DE QUADROS


Quadro 3.1. Determinação da Área Abaixo da Curva para determinado tipo de movimento de vertente com base no VI. ....	42
Quadro 4.1. Movimentos de vertente identificados no Concelho de Tarouca com as diferentes técnicas de inventariação. ....	49
Quadro 4.2. Solos e respectiva área abrangida por unidade pedológica no Concelho de Tarouca....	56
Quadro 4.3. Probabilidades <i>a priori</i> nos três tipos de movimentos de vertente. ....	59
Quadro 4.4. Probabilidades condicionadas obtidas para as classes dos factores de predisposição nos três tipos de movimentos de vertente considerados na modelação da susceptibilidade. ....	59
Quadro 4.5. Valores Informativos e valores “fuzificados” obtidos para as classes dos factores de predisposição nos três tipos de movimentos de vertente considerados. ....	61
Quadro 4.6. Descrição dos níveis de susceptibilidade e respectiva área abrangida no Concelho. ....	62
Quadro 4.7. Descrição dos níveis de susceptibilidade para o operador Sum da Lógica <i>Fuzzy</i> e respectiva área abrangida no concelho. ....	66
Quadro 4.8. Descrição dos níveis de susceptibilidade para o operador Gamma da Lógica <i>Fuzzy</i> e respectiva área abrangida no concelho. ....	68
Quadro 4.9. Área Abaixo da Curva dos modelos preditivos.....	71
Quadro 4.10. Índices <i>accountability</i> e <i>reliability</i> para os vários factores de predisposição usados na modelação da susceptibilidade. Os valores a negrito destacam os factores mais importantes no conjunto dos mapas temáticos nos dois parâmetros. ....	72
Quadro 4.11. Ordem e quantidade de variáveis consideradas nas várias combinações para a determinação da susceptibilidade a deslizamentos rotacionais. ....	73
Quadro 4.12. Ordem e quantidade de variáveis consideradas nas várias combinações para a determinação da susceptibilidade a deslizamentos translacionais. ....	74
Quadro 4.13. Ordem e quantidade de variáveis consideradas nas várias combinações para a determinação da susceptibilidade a escoadas. ....	75
Quadro 4.14. Percentagem de área deslizada acumulada considerada para a construção do mapa de susceptibilidade a movimentos de vertente. ....	77
Quadro 5.1. Percentagem de área por cada classe de Risco nas freguesias do Concelho de Tarouca. ....	83
Quadro 5.2. Elementos expostos por classe de Risco.....	85





## ANEXOS

**Anexo 1.** Ficha de inventariação dos movimentos de vertente (adaptada de ZÊZERE, 1997).

 <div style="display: inline-block; vertical-align: middle; text-align: center;"> <b>Dissertação de Mestrado em Geografia Física e Ordenamento do Território</b>   <b>INVENTÁRIO DE MOVIMENTOS DE VERTENTE NO MUNICÍPIO DE TAROUCA</b> </div>	
1. Ficha nº _____ 2. Data de levantamento ____/____/____	
<b>A. LOCALIZAÇÃO</b> 3. Mapa _____ 4. Nome _____ 5. Coordenadas _____N_____W	
<b>B. TIPO DE MOVIMENTO</b>  6. 1. Deslizamento <input type="checkbox"/> 6.1.1. Rotacional <input type="checkbox"/> 6.1.2. Translacional <input type="checkbox"/> 6.1.3. Translacional superficial <input type="checkbox"/> 6. 2. Escoada <input type="checkbox"/> 6. 3. Desabamento <input type="checkbox"/> 6. 4. Balançamento <input type="checkbox"/> 6. 5. Expansão lateral <input type="checkbox"/> 6. 6. Desliz/desab/exp.lateral <input type="checkbox"/> 6. 7. Movimento complexo <input type="checkbox"/> 6. 8. Indeterminado <input type="checkbox"/>  7. Material afectado : 7.1. Depósito <input type="checkbox"/> 7.2. Substrato <input type="checkbox"/>	
<b>C. GEOLOGIA DO SUBSTRATO</b>  8.1. Monitológico <input type="checkbox"/> _____ Sigla _____ 8.2. Plunitológico <input type="checkbox"/> _____ Sigla _____ _____ Sigla _____ _____ Sigla _____ _____ Sigla _____  9. Estrutura: 9.1. Estratificação <input type="checkbox"/> <span style="display: inline-block; vertical-align: middle; text-align: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Inclinação</div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> <div style="text-align: center;">Valor</div> <div style="text-align: center;">Orientação</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 20px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 20px;"></div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 20px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 20px;"></div> </div> </span> <div style="display: inline-block; vertical-align: middle; margin-left: 10px;">           9.2. Fracturas <input type="checkbox"/>            9.3. Falhas <input type="checkbox"/> </div>	
<b>D. GEOLOGIA DAS FORMAÇÕES SUPERFICIAIS</b>  10.1. Solo <input type="checkbox"/> 10.2. Depósito <input type="checkbox"/> _____ 11. Espessura : 11.1. Mínima ____m 11.2. Máxima ____m	
<b>E. COBERTO VEGETAL E USO DO SOLO</b>  <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;">           12. Inculto <input type="checkbox"/>            12.1. Permanente <input type="checkbox"/>            12.2. Ocasional <input type="checkbox"/>            13. Pastagem <input type="checkbox"/>            14. Matagal <input type="checkbox"/>            15. Arbustos <input type="checkbox"/> </div> <div style="width: 45%;">           16. Floresta <input type="checkbox"/>            16.1. Pinheiro <input type="checkbox"/> 16.3. Eucalipto <input type="checkbox"/> 16.4. Outros _____            17. Culturas <input type="checkbox"/>            17.1. Cereal <input type="checkbox"/> 17.2. Olival <input type="checkbox"/> 17.3. Pomar <input type="checkbox"/>            17.4. Horta <input type="checkbox"/> 17.5. Outros _____         </div> </div>	
<b>F. MORFOLOGIA DA VERTENTE</b>  <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;">           18. Altitude máxima ____ m            21. Exposição ____ N         </div> <div style="width: 30%;">           19. Comando ____ m            21. Perfil vertical            21.1. Côncavo <input type="checkbox"/>            21.2. Convexo <input type="checkbox"/>            21.3. Rectilíneo <input type="checkbox"/> </div> <div style="width: 30%;">           20. Distância topo/base da vertente ____ m            22. Perfil horizontal            22.1. Côncavo <input type="checkbox"/>            22.2. Convexo <input type="checkbox"/>            22.3. Rectilíneo <input type="checkbox"/> </div> </div>	

**G. CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO**

23. Movimento: 23.1. *Certo* ☐ 23.2. *Provável* ☐

24. Datas: 24.1. *Primeiro movimento* \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_ 24.1. *Último movimento* \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

25. Estado da actividade: 25.1. *Activo* ☐ 25.2. *Dormente* ☐ 25.3. *Estabilizado* ☐

26. Estilo da actividade:

26.1. *Simple* ☐ 26.3. *Sucessivo* ☐ 26.5. *Compósito* ☐

26.2. *Múltiplo* ☐ 26.4. *Complexo* ☐

27. Distribuição da actividade:

27.1. *Retgressão* ☐ 27.3. *Alargamento* ☐ 27.5. *Diminuição* ☐

27.2. *Avanço* ☐ 27.4. *Progressão múltipla* ☐ 27.6. *Confinamento* ☐

28. Morfologia:

28.1. Cicatriz

28.1.1. *Simple* ☐ 28.1.3. *Altura* \_\_\_\_ m

28.1.2. *Múltipla* ☐ 28.1.4. *Extensão* \_\_\_\_ m

29.1. Desnível cicatriz/limite jusante movimento \_\_\_\_ m

29.2. Distância topo vertente/ cicatriz principal \_\_\_\_ m

29.3. Distância extremidade jusante/base da vertente \_\_\_\_ m

30. Morfometria:

		C	S		C	S
30.1. <i>Comprimento área depleção</i>	____m	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30.7. <i>Largeza máx. área afectada</i>	____m	<input type="checkbox"/>
30.2. <i>Comprimento área acumulação</i>	____m	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30.8. <i>Extensão de deslocação</i>	____m	<input type="checkbox"/>
30.3. <i>Comprimento área total</i>	____m	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30.9. <i>Profund. máx. plano ruptura</i>	____m	<input type="checkbox"/>
30.4. <i>Comprimento área Rupt. exposta</i>	____m	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30.10. <i>Área do sector afectado</i>	____m <sup>2</sup>	<input type="checkbox"/>
30.5. <i>Largeza área de acumulação</i>	____m	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30.11. <i>Volume material afectado</i>	____m <sup>3</sup>	<input type="checkbox"/>
30.6. <i>Largeza área de depleção</i>	____m	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			

C – Certo S – Suposto

31.1. Dedive original \_\_\_\_\_ 31.1.1. Limite esquerdo \_\_\_\_ 31.1.2. Limite direito \_\_\_\_

31.2. Dedive final \_\_\_\_\_

**H. CAUSAS PROVÁVEIS**

32. Litologia ☐ 33. Precipitação ☐ 34. Permeabilidade ☐ 35. Obstrução de drenagem ☐

36. Estrutura:

36.1. *Estratificação* ☐ 36.2. *Falhas* ☐

37. Características da vertente:

37.1. *Dedive* ☐ 37.2. *Exposição* ☐

38. Actividade Humana:

38.1. *Desflorestação* ☐ 38.5. *Aterro* ☐

38.2. *Cultivo* ☐ 38.6. *Desaterro* ☐

38.1. *Área abandonada* ☐ 38.5. *Outros taludes* ☐

38.1. *Estrada* ☐

39. Outro processo \_\_\_\_\_

39.1. *A montante* ☐ 39.2. *A jusante* ☐

**I. DANOS**

40. Materiais: \_\_\_\_\_ Custo: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

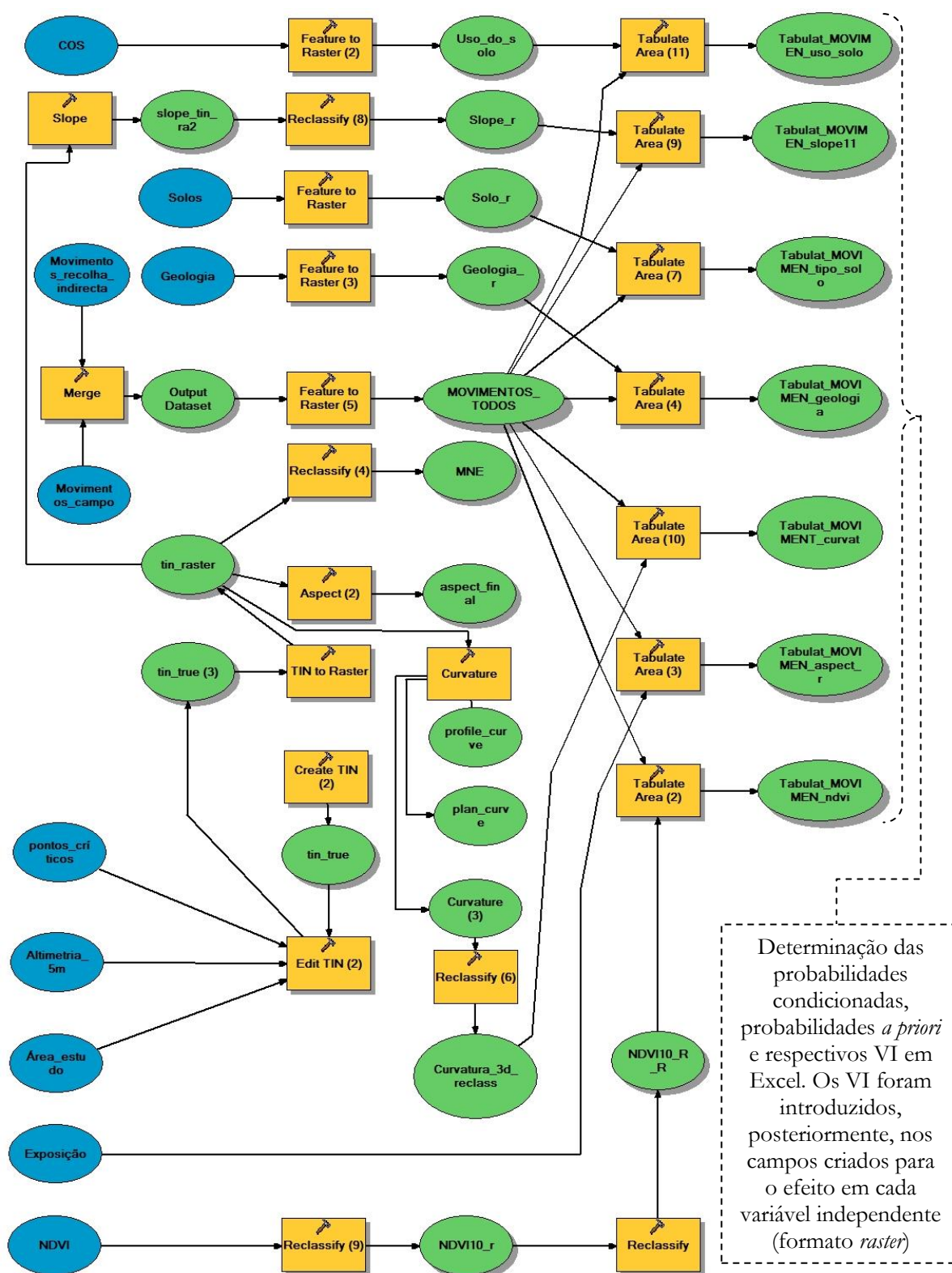
\_\_\_\_\_

41. Mortes \_\_\_\_\_

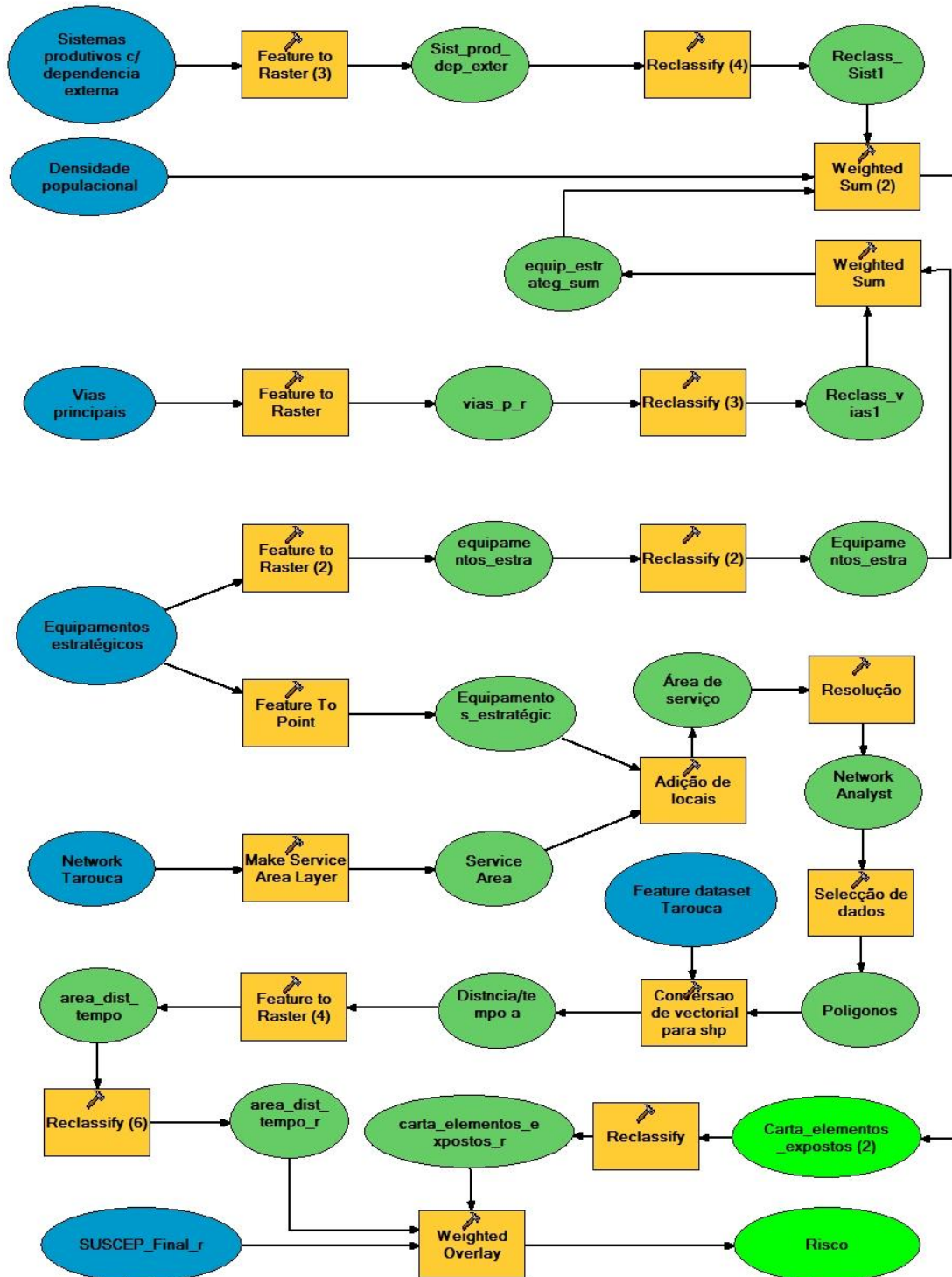
**H. INFORMAÇÃO COMPLEMENTAR**

42.1. Registo de campo ☐ 42.2. Registo GPS ☐ \_\_\_\_\_ 42.3. Fotografia ☐ \_\_\_\_\_

**Anexo 2.** Modelo de reclassificação de variáveis utilizadas na determinação da susceptibilidade a movimentos de vertente e respectivos cruzamentos entre variáveis.



Nota: a cor azul representa os dados de entrada (*input*), a amarela a ferramenta utilizada na operação e a verde os dados de saída (*output*).

**Anexo 3.** Modelo de determinação do risco a movimentos de vertente no Model Builder.

**Anexo 4.** Modelo de determinação de rotas alternativas no Model Builder e ArcMAP em função das áreas mais susceptíveis a movimentos de vertente.

